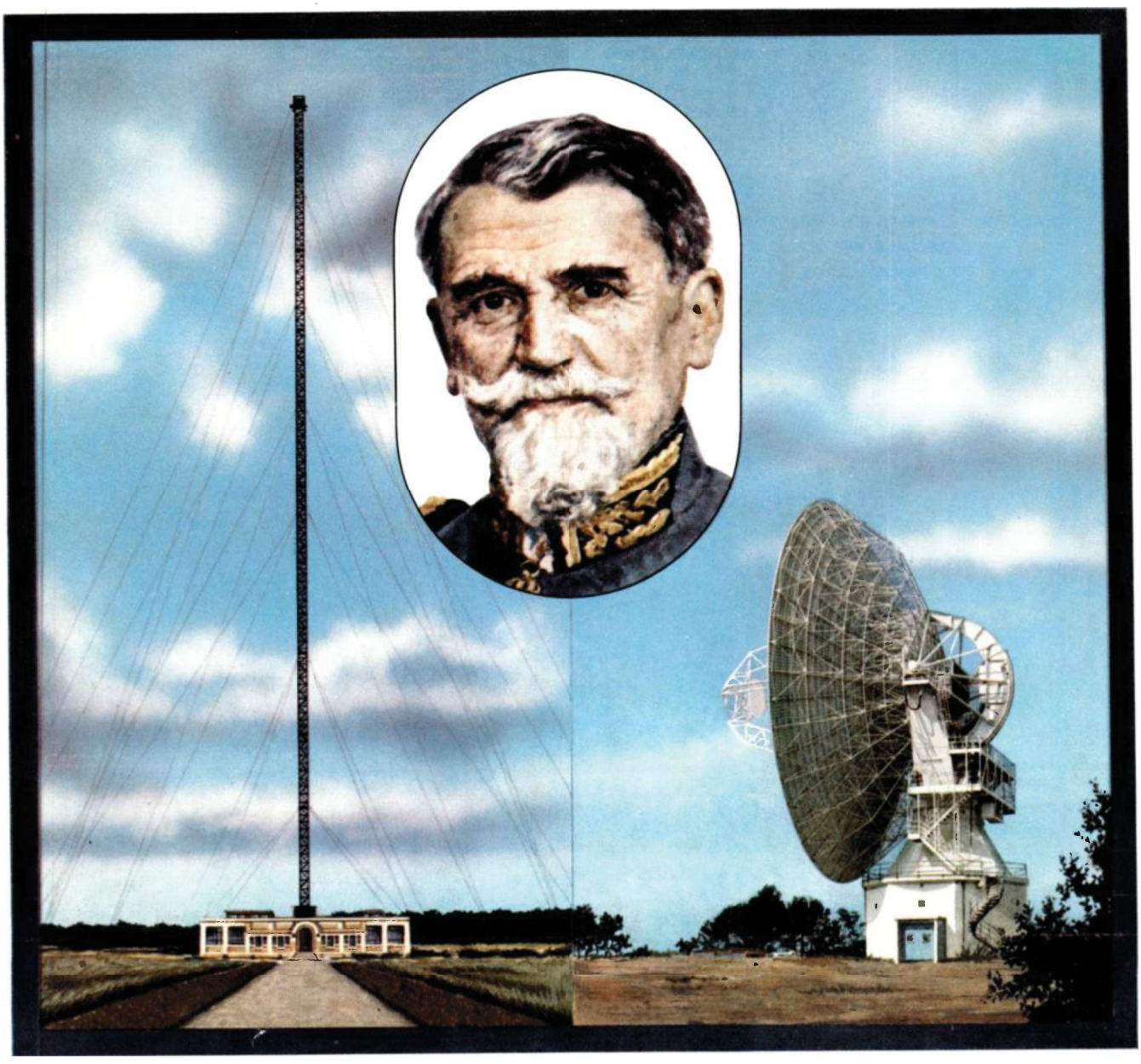
l'onde électrique

cinquantenaire

LIBRARY, ENVIRONMENTAL RESEARCH
LABORATORIES, NATIONAL OCEANIC AND
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
BOULDER, COLORADO
AUG 25 1971

LOCATION:
☐ Latest issue to staff
☐ Current issues
☐ Back issues only
☐ Other

revue mensuelle
de la
Société française
des électroniciens
et des radioélectriciens



vol. 51 - fasc. 7 - juillet-août 1971 - prix 10 F

Editions Chiron, Paris

ANALYSE RAPIDE ET PRÉCISE CONTROLE, MISE EN ŒUVRE DES SYSTÈMES DE TRANSMISSION EN AM, FM, BLU, BLI, etc...

REPRÉSENTATION SUR SCOPE DU SIGNAL PRINCIPAL ET DES SIGNAUX PARASITES PERMETTANT LA MESURE SIMULTANÉE DE LEUR FRÉQUENCE ET NIVEAU RESPECTIFS (dynamique > 60 dB)

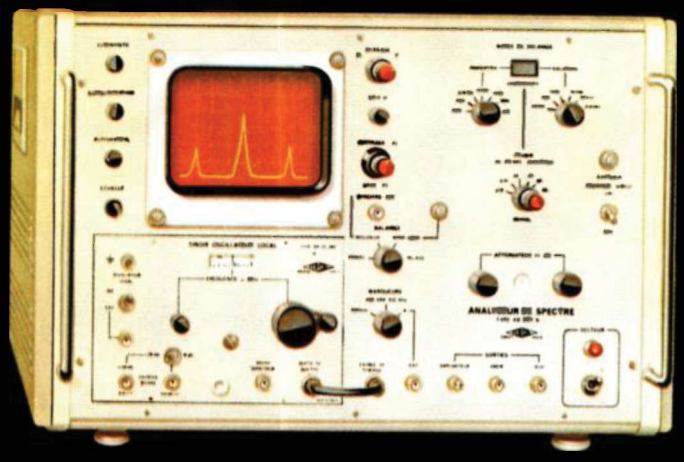
OSCILLATEUR LOCAL A VERROUILLAGE DE PHASE (précision 2.10^{-5})

POUVOIR DE RÉSOLUTION ÉLEVÉ

4 MODES DE BALAYAGE
■ Manuel ■ Mono-coup ■ Automatique interne et externe

INDICATION LUMINEUSE ET AUTOMATIQUE DE LA DURÉE DE BALAYAGE RECOMMANDÉE, EN FONCTION DE L'"EXCURSION" ET DE LA "RÉSOLUTION" CHOISIES

SORTIES AUXILIAIRES
■ Vidéo ■ Dents de scie de balayage
■ Enregistreur X-Y



analyseur de spectre type XA 301

100 kHz à 40 MHz

avec tiroir transposeur TXA 302

... jusqu'à 500 MHz

avec oscillateur local exterieur

PRINCIPAUX PARAMÈTRES ÉTALONNÉS

■ POUVOIR DE RÉSOLUTION A 3 dB:
de 3 Hz a 3000 Hz en 7 valeurs prereglees

■ EXCURSION
6 valeurs prereglees de ± 100 Hz à ± 50 kHz

■ DURÉE DE BALAYAGE
de 0,1 s a 30 s

■ ATTÉNUATEUR F.I. DÉCIMAL
0 a 69 dB par bonds de 1 dB

■ RÉPONSE VIDÉO
linéaire ou logarithmique (plage de 60 dB) avec contrôle de linéarité. Sensibilité : 20 µV pour la déviation totale sur le tube en réponse logarithmique.

■ 3 MARQUEURS INTERNES
étalonnés en fréquence (± 3.10^{-5}) et en niveau (± 1 dB)

A ÉTAT SOLIDE

Documentation franco sur demande

18, av. P.-Vaillant-Couturier - 78-Trappes - FRANCE
Tél. 462.88.88 - Telex : 25705 - Câble : Feritrappes
Ets GEFFROY & Cie . S.A. cap 10.230.000 F
Délégations Régionales: LYON — RENNES — TOULOUSE
Bureaux Techniques : MUNICH — MILAN

du continu...

FERISOL

...aux hyperfréquences

339 845

l'onde électrique

cinquantenaire

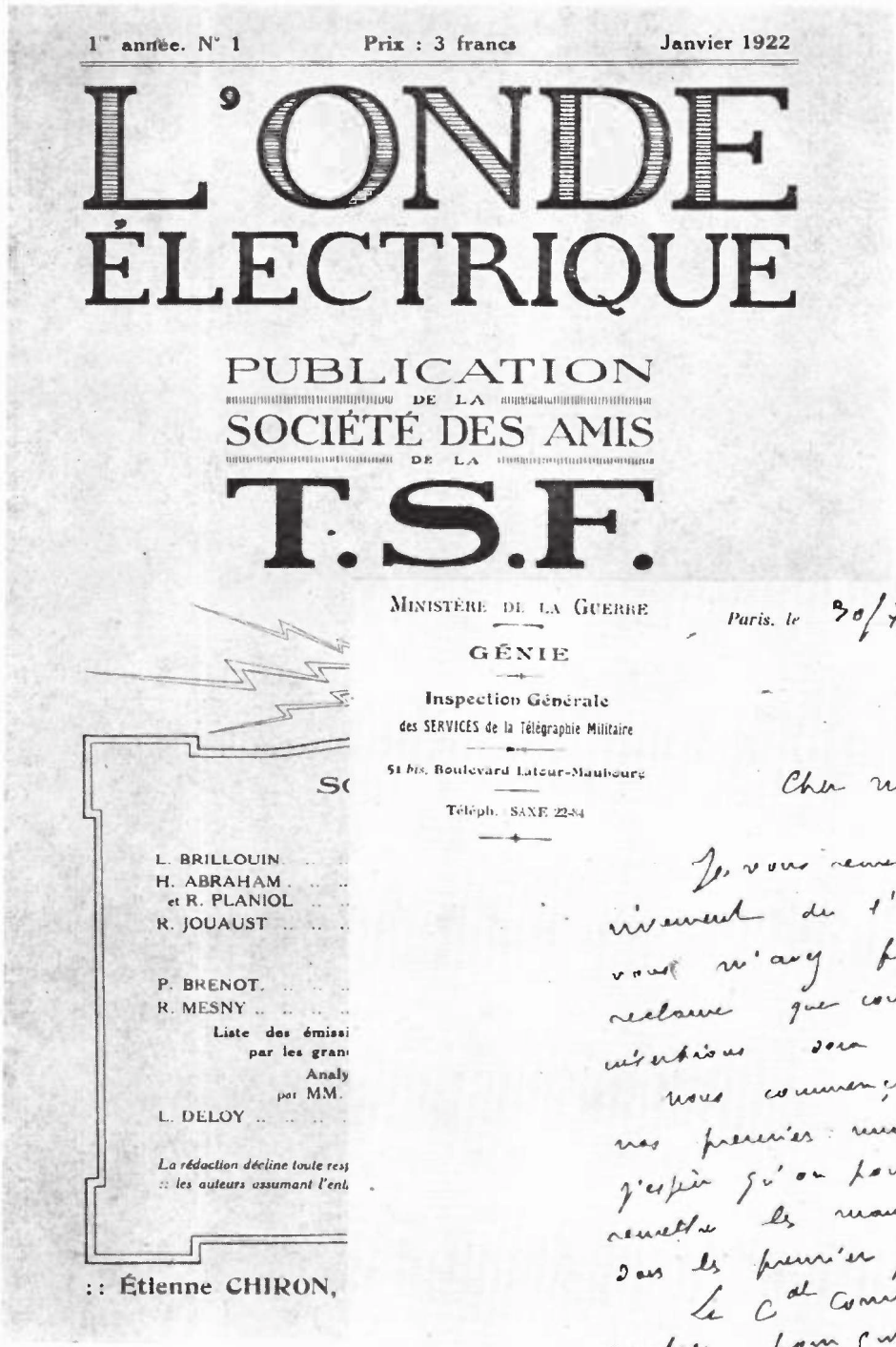
1er juillet 1921. C'est la date qui figure au bas de l'acte de fondation de la Société des Amis de la TSF. Par la volonté d'une petite équipe animée par la prestigieuse personnalité du Général FERRIÉ, l'association qui est devenue depuis la Société Française des Electroniciens et des Radioélectriciens, voyait le jour.

Le Conseil de la SFER a décidé que le cinquantenaire de cet événement serait marqué par la publication d'un numéro exceptionnel de *L'Onde Electrique*. Les auteurs des articles qui suivent n'ont pas ménagé leurs efforts pour que notes historiques, synthèses, mises au point par spécialités et vues prospectives fassent de ce fascicule un numéro de référence. Leur œuvre a d'ailleurs dépassé le cadre d'une publication mensuelle, fût-elle exceptionnelle, et nos lecteurs trouveront dans le numéro de septembre 1971 plusieurs articles qui constituent une suite à ceux qu'ils peuvent lire ici.

Le Comité de *L'Onde Electrique* remercie vivement toutes les personnes qui ont permis de mener à bien ce travail et particulièrement Monsieur l'Ingénieur Général Pierre DAVID, ancien Président de la SFER qui en fut le maître d'œuvre.

Le Comité exprime sa respectueuse gratitude à Monsieur Louis de BROGLIE, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, Prix Nobel de Physique, ancien Président de la SFER, qui a bien voulu évoquer, en préface, l'essor de la Radioélectricité et de l'Electronique pendant le dernier demi-siècle.

A. FLAMBARD
Président du Comité de L'Onde Electrique.



1re année. N° 1 — Prix : 3 francs — Janvier 1922

L'ONDE ÉLECTRIQUE

PUBLICATION DE LA SOCIÉTÉ DES AMIS DE LA

T.S.F.

L. BRILLOUIN ..
H. ABRAHAM ..
et R. PLANIOL ..
R. JOUAUST ..

P. BRENOT ..
R. MESNY ..

Liste des émissi
par les gran
Analy
par MM.

L. DELOY ..

*La rédaction décline toute resp
les auteurs assumant l'ent*

:: Étienne CHIRON,

MINISTÈRE DE LA GUERRE

GÉNIE

Inspection Générale
des SERVICES de la Télégraphie Militaire

51 bis, Boulevard Latour-Maubourg

Téléph. SAXE 22-84

Paris. le 30/7/21

Cher monsieur

Je vous remercie très vivement de l'envoi que vous m'avez fait. La revue que comporte vos intentions sera excellente.

Nous commençons à préparer nos premiers numéros et j'espère qu'on pourra vous remettre les manuscrits du 1er dans les premiers jours d'octobre.

Le Cdt Corum vient de rentrer, pour quelque temps, mais je ne l'ai pas encore vu et je ne sais pas où en sont les envois de bulletins et de adhésions.

Veuillez agréer, cher Monsieur, l'expression de mes sentiments très distingués

Ferrié

L. de BROGLIE

Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences. Membre de l'Académie française. Président d'Honneur de la SFER

Sur le prodigieux essor de la radioélectricité et de l'électronique au XX^{e} siècle

Dans l'une des frappantes formules qu'il a souvent employées dans ses écrits, Daniel Halévy a parlé de « l'accélération de l'histoire ». Il voulait exprimer ainsi qu'à l'époque contemporaine, les connaissances et les conditions de vie des hommes s'étaient plus modifiées en quelques décennies qu'elles ne l'avaient fait pendant les siècles précédents. Les progrès de nos connaissances des phénomènes radioélectriques et électroniques et l'extraordinaire multiplication de leurs applications depuis une soixantaine d'années en constituent un remarquable exemple.

Affecté avant et pendant la guerre de 1914 dans les services techniques de la Radiotélégraphie militaire, j'ai eu le privilège d'assister au premier essor de la Radioélectricité et de l'Electronique. En 1914, ce que l'on appelait alors la Télégraphie sans fil, la TSF, n'employait guère encore que des émissions d'ondes hertziennes amorties dues à la décharge brusque de condensateurs chargés à l'aide d'un lourd appareillage emprunté à l'Electrotechnique de cette époque. On ne pouvait transmettre ainsi que des signaux Morse dont la réception bien imparfaite à l'aide de détecteurs à galène était très difficile en raison notamment de l'absence de tout dispositif d'amplification des signaux reçus. Et, dans cette technique assez primitive, il n'était pas question d'Electronique.

Tout à coup cependant, dans les premiers mois de la guerre de 1914, l'électron fit son apparition au poste de la Tour Eiffel lorsque fut connue l'existence de la lampe à trois électrodes mise au point peu de temps auparavant aux Etats-Unis par Lee de Forest. Très vite, ce merveilleux petit appareil transforma complètement les conditions de réception des signaux en permettant de construire des détecteurs, des amplificateurs et des hétérodynes qui firent tout de suite abandonner la modeste galène. Puis de petits émetteurs d'ondes entretenues utilisant des triodes furent étudiés et mis au point.

Il en résulta un profond changement non seulement de la technique radioélectrique, mais aussi des connaissances scientifiques qu'elle utilisait. Jusque-là, les radioélectriciens n'avaient besoin de connaître que les lois générales de l'Electricité et les équations de Maxwell qui régissent la propagation des ondes électromagnétiques. Mais à partir de ce moment, ils durent connaître aussi les propriétés des électrons et les divers aspects théoriques et pratiques de l'Electronique.

Cette introduction de l'Electronique en Radioélectricité par l'intermédiaire des tubes à trois ou plusieurs électrodes améliora considérablement aussi les procédés d'émission des ondes hertziennes entretenues et permit la modulation de ces ondes. C'est cette modulation qui a rapidement rendu

possible la transmission de la parole par la Téléphonie sans fil, et par suite, la Radiodiffusion. S'accélérant sans cesse, les progrès de la Radioélectricité ont conduit rapidement à toutes sortes d'applications nouvelles, notamment par l'emploi d'ondes hertziennes de longueurs d'onde de plus en plus courtes et par le remplacement des tubes par des transistors. On a vu alors se développer la technique des radars, des guides d'ondes et des faisceaux hertziens, la mise au point progressive de la Télévision et, plus récemment, de la Télévision en couleurs. Dans toutes ces merveilleuses réalisations techniques, l'Electronique a constamment joué un rôle essentiel puisque, par exemple, c'est le mouvement des électrons au sein de leurs ondes dans les semiconducteurs qui a permis de comprendre et de prévoir le fonctionnement des transistors. Et c'est aussi la merveilleuse flexibilité des trajectoires électroniques qui a rendu possible la réalisation de la Télévision, ce que ne pouvait faire aucun dispositif mécanique en raison de sa trop grande inertie.

Mais, en dehors du domaine de la Radioélectricité, l'Electronique a eu aussi d'innombrables et de plus en plus importantes applications dans les domaines les plus variés. Les cellules photoélectriques, les photopiles, les cellules photoconductrices sont de plus en plus utilisées dans les techniques les plus diverses. Il en est de même des multiplicateurs d'électrons employés notamment dans les caméras électroniques mises au point par M. Lallemand et si importantes pour les recherches astronomiques. Il ne peut être question d'énumérer ici tous les dispositifs électroniques actuellement réalisés et leurs utilisations techniques. Disons seulement qu'ils jouent aujourd'hui un rôle essentiel dans l'amélioration des transmissions téléphoniques et télégraphiques, dans la construction et le perfectionnement des ordinateurs et dans d'innombrables applications, même dans le domaine médical et chirurgical.

De plus, les électrons interviennent aussi à l'heure actuelle dans toutes les recherches scientifiques. Par exemple, je ne saurais évidemment oublier que la Diffraction des électrons et le Microscope électronique avec ses énormes grossissements, réalisations intimement reliées aux conceptions de la Mécanique ondulatoire, ont rendu et rendent chaque jour davantage les plus grands services à tous ceux qui étudient les plus fines structures de la matière et les détails les plus cachés de la Biologie.

Le tableau très résumé et certainement très incomplet que je viens de donner des progrès accomplis en une soixantaine d'années par la Radioélectricité et l'Electronique montre avec quelle prodigieuse rapidité se sont succédé pendant cette période les progrès de nos connaissances et de leurs applications techniques dans ce domaine. Et c'est bien là l'un des aspects de l'évolution de plus en plus accélérée de notre civilisation, évolution qui fait de notre temps une des plus étonnantes périodes de l'histoire des hommes.

P. BESSON

Ingénieur Général
des Ponts et Chaussées
Ancien Président
de la SFER

R. CABESSA

Directeur à la CII
Vice-Président
de la SFER

De la "Société des Amis de la TSF" à la "SFER"

PREMIÈRE PARTIE *
— 1921 à 1945 —

On a souvent souligné qu'au cours de la guerre 1914-1918, l'un des très grands mérites du Général FERRIÉ avait été d'arriver à constituer, auprès de lui, une véritable « équipe » d'ingénieurs, de physiciens et de techniciens, militaires ou civils, et à les faire travailler en commun, sans trop s'occuper des grades qu'ils pouvaient posséder dans l'armée, les fonctions confiées à chacun ne dépendant que de sa personnalité, de ses connaissances et de ses aptitudes.

L'autorité du Général et la confiance qu'il inspirait, d'une part, la véritable passion que chaque membre de l'équipe manifestait pour la radioélectricité, le sentiment d'extrême utilité des études et des réalisations poursuivies, la certitude de contribuer ainsi à la victoire finale, d'autre part, évitaient toute friction et faisaient régner une atmosphère de chaude cordialité, très favorable au développement des recherches.

Il était dès lors tout naturel qu'en 1919, la démobilisation venue, l'un des soucis du Général fut de rechercher les moyens de maintenir de fructueux contacts entre ceux de ses collaborateurs qui, rendus à la vie civile, allaient se disperser et reprendre leurs activités du temps de paix. Tout naturellement, et à l'image de ce qui existait déjà dans d'autres domaines scientifiques et techniques d'origines plus anciennes, l'idée lui vint donc de créer une « Société savante », naturellement sans but lucratif, une « Association », au sens de la Loi du 1er juillet 1901 — cela, sans préjudice d'autres réalisations, telles que le Laboratoire National de Radioélectricité, par exemple.

Une réunion mémorable eut donc lieu dans le petit bureau du Général, en ce très célèbre « 51 *bis*, boulevard de Latour-Maubourg », qui a maintenant reçu une autre affectation, et devant lequel aucun de ceux qui ont fréquenté les services de la Radiotélégraphie Militaire, et, en particulier, ceux de l'Etablissement Central du Matériel Radiotélégraphique (ECMR) ne passe aujourd'hui sans quelque sentiment de mélancolie...

Y assistaient, ceux que le Général avait jugés plus particulièrement aptes à apporter à l'Association à créer le fruit de leur expérience, le prestige de leur autorité, l'étendue de leurs connaissances. Ce furent les « Fondateurs » qui, outre, naturellement, le Général lui-même, comprirent le professeur de physique de l'Ecole Normale Supérieure Henri ABRAHAM (depuis, Président d'Honneur de la Société, et mort pour la France), le professeur de physique de l'Ecole Polytechnique A. PÉROT, l'un des co-inventeurs du célèbre interféromètre « Fabry-Pérot », un « homme des courants forts », J. PARAF, directeur de la Société des Forces motrices de la Vienne, un chef de bataillon du Génie en retraite, J. CORNU, qui devait devenir le premier Secrétaire Général de la Société, enfin le principal adjoint du Général FERRIÉ, le Colonel BRENOT, qui allait poursuivre, dans l'industrie radioélectrique, une éclatante carrière.

Un autre ami du Général, dont la plus grande partie de l'existence se passa au lit, l'Inspecteur Général des Ponts et Chaussées A. BLONDEL, Membre de l'Institut, inventeur de l'oscillographe, de systèmes d'antennes directionnels, de radiophares, n'avait pu venir, du fait de son état de santé, mais avait assuré le Général de tout son concours.

La petite histoire rapporte que trois autres personnes prirent également part à la réunion : le

* Cette partie est due à M. P. BESSON.

Professeur d'Hydrographie René MESNY, grand spécialiste de la radiogoniométrie, inventeur du « compensateur » et, plus tard, du montage oscillateur symétrique — qui succéda rapidement au Commandant CORNU comme Secrétaire Général de la Société, dont il devint plus tard Président, après en avoir été, pendant de longues années, le véritable animateur — Raymond JOUAUST, Sous-Directeur du Laboratoire Central d'Electricité — futur Président de la Société, lui aussi — enfin l'éditeur Etienne CHIRON, qui n'avait pas eu encore à aborder le domaine des publications radioélectriques, mais qui était bien connu par ses livres techniques ou de vulgarisation sur l'automobile et l'aviation. Lorsqu'on en vint à parler du journal périodique qu'aurait à faire paraître la nouvelle Société, et que les fondateurs, unanimes, eurent choisi pour titre « L'Onde Electrique », ce fut lui qui proposa, pour la couverture, cette couleur, qui aurait pu être baptisée « vert radioélectrique » et que nos Membres les plus anciens n'ont pas oubliée.

Pourquoi cette dénomination de « Société des Amis de la TSF » ? Au cours de diverses conversations ultérieures, le Général et le Professeur MESNY l'ont indiqué (1). Les fondateurs désiraient, certes, créer une Société « savante », analogue, par exemple, à sa grande aînée, la Société Française des Electriciens, mais, étant donné l'intérêt qu'un public cultivé, même non technicien, portait déjà à la télégraphie sans fil — intérêt que l'avènement prévisible de la radiodiffusion allait encore accroître — ils espéraient (et, il faut bien le reconnaître, cet espoir a été quelque peu déçu) attirer aussi des « mécènes » dont les apports financiers auraient permis d'encourager certaines recherches.

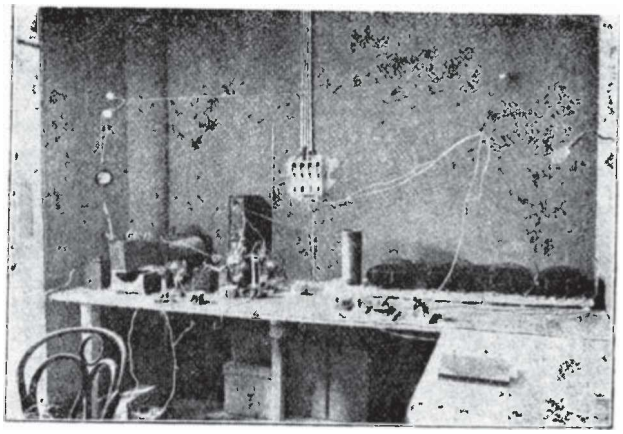
Le Général FERRIÉ tint à payer de sa personne, et c'est lui qui, au cours d'une conférence qu'il fit à l'Amphithéâtre de Physique de l'Ecole Polytechnique, le 26 janvier 1922, annonça la création de la nouvelle Société. Les nombreux invités et l'Etat-major de l'Ecole assistèrent à des présentations de matériels et à d'intéressantes démonstrations.

⁂

La Société des Amis de la TSF était « lancée », et les adhésions affluèrent. Le 22 mai 1922, eut lieu, sous la présidence du professeur A. PÉROT, sa première Assemblée Générale, au cours de laquelle fut élu son premier Président, le Duc Maurice DE BROGLIE, ancien officier de Marine et éminent physicien.

Dès janvier 1922, *L'Onde Electrique* avait commencé à paraître, et on ne parcourt pas aujourd'hui sans quelque émotion son premier numéro, auquel avaient collaboré tant d'auteurs prestigieux : Léon BRILLOUIN, avec ses amplificateurs à résistances (2) réalisés en collaboration avec Georges BEAUVAIS, Henri ABRAHAM et son collaborateur René PLANIOL — seul survivant de tous ceux dont la signature figure dans ce premier numéro — Raymond JOUAUST, avec l'amplificateur Z, le Colonel BRENOT, décrivant la grande station de Sainte-Assise, le professeur MESNY enfin, avec ses dispositifs de mesure des rayonnements radioélectriques.

A partir du second numéro, une rubrique, confiée à l' « Amateur » Léon DELOY, qui venait de s'illustrer au cours des « Essais transatlantiques », en faisant fonctionner un petit poste émetteur à ondes courtes, qui fut entendu aux Etats-Unis, fut consacrée aux « Amateurs », qui vinrent y puiser maints renseignements pour la construction et le réglage de leurs postes récepteurs d'abord, de leurs ensembles d'émission ensuite.



Le poste d'émission 8AB de L. DELOY.
(Reproduction d'une photographie parue dans *L'Onde Électrique* de décembre 1923).

Pour l'organisation de ces « Essais transatlantiques », qui devaient révéler les propriétés jusqu'alors inconnues des ondes courtes (décamétriques), la Société s'était rapprochée des deux associations, plus spécialement destinées aux amateurs, la Société d'Etudes de Télégraphie et de Téléphonie sans fil, remontant à 1912, le « Radio-Club de France », de création plus récente. Un Comité spécial avait été créé, présidé par l'un des pionniers de l'amateurisme radio en France, le docteur Pierre CORRET, qui devait d'ailleurs plus tard, en 1933 et 1934, seconder le Secrétaire Général de la Société en remplissant les fonctions de Délégué Général. Les heureux résultats de la collaboration ainsi instituée conduisirent, dès lors, les trois Sociétés à créer, le 15 octobre 1923, un « Comité intersociétaire », chargé de coordonner leurs travaux. Enfin, en 1929, elles décidèrent de fusionner, pour ne laisser subsister que la Société des Amis de la TSF, groupant tous les radioélectriciens, professionnels et amateurs.

Entre temps, la Société avait, dès 1923, créé, au Conservatoire National des Arts et Métiers, un cours gratuit de TSF, avec travaux pratiques, patronné par le Général FERRIÉ et dont la première séance avait été présidée par le Président Paul PAINLEVÉ, professeur à l'Ecole Polytechnique. En décembre de la même année, elle avait participé à l'organisation, au Grand Palais, d'une importante Exposition de Physique.

(1) Voir dans *L'Onde Electrique* de 1933, le compte rendu de l'Assemblée Générale du 24 mai 1933, pages II et IV.

(2) On rappellera que l'article dont il est question ici a été reproduit intégralement dans le numéro de janvier 1964 de l'*Onde Electrique*.

En 1925, à la suite, notamment, d'échanges de vue entre le Comité Intersociétaire et l'importante association d'amateurs américains, l' « American Radio Relay League » (ARRL), un double Congrès fut réuni à Paris, l'un, de caractère juridique, l'autre concernant le statut des amateurs ; à l'issue de ce dernier, fut créée l'Union Internationale des Amateurs Radio (International Amateur Radio Union, IARU), dont le premier Président fut le Président de l'ARRL, M. Hiram PERCY MAXIM.

C'est quelques années plus tard que le titre de « Société des Amis de la TSF », adopté à l'origine pour les raisons rappelées ci-dessus, ne parût plus répondre assez bien aux activités effectives de l'association, et, le 24 mai 1933, l'Assemblée Générale lui substitua celui, plus conforme aux précédents, de « Société des Radioélectriciens » (3).

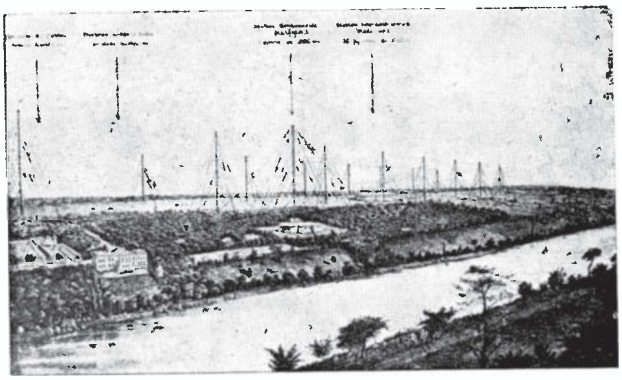
⁂

D'une façon générale, l'activité de la Société se manifestait principalement — en dehors de la publication de *L'Onde Electrique* — par des conférences périodiques qui avaient lieu, en principe chaque mois, d'abord dans la salle de la « Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale », rue de Rennes, ensuite à l'Amphithéâtre de Physique de la Sorbonne. On ne saurait évidemment les énumérer toutes (4), mais on rappellera celle du 14 novembre 1922, au cours de laquelle l'ingénieur américain ARMSTRONG vint exposer, avec expériences à l'appui, son procédé de « super-réaction », celle de 1928, exceptionnellement présidée par le Général FERRIÉ lui-même, qui vit le physicien néerlandais B. VAN DER POL présenter ses recherches sur les oscillations de relaxation constituées par les battements du cœur, celle de 1936, au cours de laquelle l'ingénieur américain ZWORYKIN exposa les résultats de ses études en matière d'optique électronique et de tubes multiplicateurs d'électrons, ainsi que les réunions de la même année consacrées à des démonstrations de réception de télévision et à des essais de stéréophonie.

Si l'année 1932 fut tristement marquée par la disparition du Général FERRIÉ — à la mémoire duquel la Société consacra un numéro spécial de *L'Onde Electrique* — ce fut aussi l'année qui vit la création d'un « Comité d'Etudes », chargé d'examiner et de rapporter diverses questions techniques que l'on pouvait difficilement présenter et discuter devant un auditoire trop nombreux, et qui fut l'ancêtre des « Sections » spécialisées actuelles.

⁂

Une autre activité de la Société consistait en l'organisation de visites d'installations radioélectriques, d'usines ou de laboratoires. C'est ainsi que de nombreux Membres visitèrent la station de Sainte-Assise, de la compagnie Radio-France, la station d'émission des PTT de Pontoise, et la station de réception conjuguée de Noiseau, le Laboratoire National de Radioélectricité, la station de radiodiffusion du Petit Parisien, les Laboratoires LMT (aujourd'hui Laboratoire Central de Télécommunications LCT), la station d'essais météorologiques de Trappes, les studios de Radio-Cinéma, la plupart des stations de radiodiffusion de la région parisienne, etc.



Les antennes de la Station de Ste-Assise.
(Reproduction d'une photographie parue dans *L'Onde Electrique* de janvier 1922).

En juin 1937, un voyage d'études de trois jours fut organisé, au cours duquel les stations du Service Radiomaritime des PTT voisines de Nantes (Séverac, pour l'émission, Donges pour la réception) furent tout d'abord visitées. Au Havre, furent ensuite présentés le radioalignement d'entrée de port sur ondes métriques en essais, les installations du bateau-feu « *Le Havre* » comportant un radiophare à ondes longues et un vibrateur sous-marin associé, les stations radiotéléphoniques du Port, enfin les toutes modernes installations radioélectriques du paquebot « *Normandie* » — parmi lesquelles le dispositif de détection électromagnétique sur ondes de 16 cm dû à la Compagnie Générale de Télégraphie sans Fil (CSF).

Les applications de la radioélectricité dans l'aviation n'étaient pas oubliées, et, en 1937 également, plusieurs séances eurent lieu au Bourget, au cours desquelles les Sociétaires purent, sur des avions Wibault et Fokker, expérimenter le premier ensemble de guidage radioélectrique pour l'atterrissage.

⁂

D'année en année, des Présidents différents s'étaient succédés à la tête de la Société, toujours élus à la quasi-unanimité des votants.

A ceux qui s'étonneraient de ne pas voir figurer parmi eux le Général FERRIÉ, on indiquera que c'était bien là un de ses souhaits, mais que, malgré sa notoriété, il ne peut faire fléchir les règles militaires de l'époque, qui ne permettaient pas à un officier en activité de prendre des responsabilités dans une

(3) La dénomination de « Société française des Radioélectriciens » avait tout d'abord été envisagée, mais, comme l'indique le Compte rendu de l'Assemblée Générale de 1933 paru dans *L'Onde Electrique*, l'adjectif « française » fut finalement supprimé à la suggestion de la « Société française des Electriciens », pour éviter une trop grande similitude de noms, risquant de créer des erreurs dans l'acheminement du courrier, les Secrétariats des deux Sociétés ayant alors la même adresse.

(4) On trouvera des indications plus complètes à ce sujet dans le Préambule du premier Annuaire que publia la Société, en 1937

Société de caractère civil (5). Quant au Colonel BRENOT, à qui la présidence fut également offerte, il estima devoir se récuser, craignant que les hautes fonctions qu'il assumait dans l'industrie ne lui laissassent pas un temps suffisant pour s'occuper de la Société comme il l'aurait souhaité. Il ne lui ménagea d'ailleurs pas son appui, et sa bienveillance se manifesta à diverses reprises, notamment pour organiser des visites d'installations techniques diverses.

Un historique de cette période serait incomplet si l'on n'indiquait que le Secrétariat de la Société fut d'abord installé 51 *bis*, boulevard de Latour-Maubourg, dans les locaux de la Radiotélégraphie militaire, puis, pendant une courte période, dans un bureau loué au Cercle Militaire, place Saint-Augustin, ensuite au Laboratoire National de Radioélectricité, à Bagneux, enfin à l'Ecole Supérieure d'Electricité, dans une partie des locaux affectés aux services administratifs de la Société Française des Electriciens — et si on ne citait les noms des collaboratrices qui assurèrent ce Secrétariat avec ponctualité et dévouement, Mme LEBLANC d'abord, Mlle MAILLOCHON ensuite, qui, à côté des Présidents et des Secrétaires Généraux, participèrent à l'élaboration de ce qui devait, à la longue, constituer un ensemble de traditions auxquelles l'expérience a montré qu'il était excellent de se conformer.

⁂

C'est ainsi que la Société des Radioélectriciens, faisant preuve d'une activité toujours accrue, allait malheureusement avoir à aborder la période de guerre, qui la toucherait très durement, dans son fonctionnement sans doute, mais aussi dans ses dirigeants et dans ses Membres.

De septembre 1939 à juin 1940, ce fut, tout d'abord, un inévitable ralentissement de son action, dû à la mobilisation générale. A partir de juin 1940, ce fut l'interruption complète, toute activité touchant, de près ou de loin, à la radioélectricité étant interdite dans la zone occupée par l'armée allemande.

La liste de tous ceux de ses Membres qui périrent, soit pour avoir participé à l'action de la Résistance, soit au moment des combats de la Libération, soit pour toute autre raison, n'a pas été établie, et on ne peut que se borner à évoquer les pertes subies par ceux qui étaient, ou avaient été, à la tête de l'association.

C'est tout d'abord son Président en exercice, l'éminent physicien Henry ABRAHAM, l'un de ses fondateurs, l'un de ceux qui, auprès du Général FERRIÉ, avaient, dès 1914, contribué à la réalisation des premières triodes françaises (Lampes TM), et qui, plus tard, en 1917, avait, avec le professeur à la Sorbonne Eugène BLOCH, inventé le « multivibrateur », permettant, en 1918, le réétalonnage de tous les ondemètres. Arrêté et déporté, ainsi que Madame ABRAHAM, son épouse, ni l'un ni l'autre ne revirent la France. En hommage à sa mémoire, la Société l'a nommé Président d'Honneur, et a créé un « Prix HENRI-ABRAHAM », décerné périodiquement à l'auteur d'un travail ayant contribué d'une manière importante au progrès de la radioélectricité ou de l'électronique (6).

C'est ensuite l'un de ses anciens Vice-Présidents, le physicien HOLWECK, chef de travaux à l'Institut du Radium, qui, dès 1912, avait réalisé des diodes à faible temps de transit, dont les filaments étaient déjà recouverts d'oxydes émissifs, qui avait ensuite mis au point des triodes de grande puissance démontables, à vide entretenu par une pompe moléculaire, également de son invention, et qui fut abattu par la Gestapo.

Parmi les anciens Membres du Conseil, le Commandant LABAT (promu ultérieurement Général, à titre posthume), chef des Transmissions des Forces Françaises de l'Intérieur (FFI) fut arrêté le 30 mars 1944, déporté au Camp de Schirmek, et abattu le 1er septembre 1944 au Camp du Struthof, en même temps que sept opérateurs-radio du Réseau « Alliance », dont il faisait également partie (7) ; le professeur Léon BLOCH, Préparateur à la Sorbonne, et auteur d'un célèbre « Traité d'Electricité théorique », ne revint pas non plus des camps de déportation — pas plus d'ailleurs que son frère Eugène BLOCH, professeur à la Sorbonne et Membre de la Société, cité déjà ci-dessus comme co-inventeur du multivibrateur.

Enfin, on soulignera une coïncidence aussi malheureuse qu'extraordinaire, concernant deux anciens Membres de la Société, qui, s'ils n'appartinrent pas à son Conseil, jouèrent néanmoins un rôle à ses débuts : lors des « Essais transatlantiques » de 1922, organisés comme il a été dit précédemment, la première place du classement, en ce qui concerne la réception des stations d'amateurs américains, était revenue à une station française construite et exploitée par deux ingénieurs, Membres de la Société, qui s'étaient associés à cette occasion (8) : Pierre LOUIS, qui avait appartenu à l'ECMR en 1914-1918 et qui s'était ensuite fait connaître en publiant, dès après la fin des hostilités, un petit livre : « La TSF par les tubes à vide », et Georges PERROUX, ingénieur à la Société LMT. Le destin voulut qu'en 1945, lors de la libération du territoire, ils soient tous deux, en des circonstances d'ailleurs différentes, fusillés par les Allemands.

⁂

(5) On constatera, en examinant la liste des Présidents successifs de la période 1945-1970, que, fort heureusement, les règles en question évoluèrent ensuite dans un sens plus libéral.

(6) On notera, au passage, que, simultanément, la Société a créé une « Médaille RENÉ-MESNY », susceptible d'être décernée, pour l'ensemble de ses travaux, à un radioélectricien ou à un électronicien.

(7) La revue *La Liaison des Transmissions* a consacré un numéro spécial (n° 59 de septembre-octobre 1969) à la mémoire du Général Labat.

(8) Voir *L'Onde Electrique*, mars 1923, page 131, et avril 1923, page 238.

Les épreuves subies n'avaient d'ailleurs pas amoindri le dynamisme de la Société qui, dès 1944, reprit ses activités et allait avoir à faire face à des tâches importantes.

De même qu'au lendemain de la première guerre mondiale, elle avait eu, alors toute jeune, à révéler à ses Membres les propriétés et les applications des tubes à vide, de même, elle se devait, après la victoire de 1945, de leur dévoiler l'évolution spectaculaire intervenue pendant les hostilités dans deux domaines techniques très différents : la modulation de fréquence, bien connue sans doute avant la guerre, mais qui n'avait alors reçu que peu d'applications, tandis que, de 1941 à 1945, elle avait été abondamment utilisée par les Alliés, notamment pour les liaisons radiotéléphoniques entre blindés — et la détection électromagnétique qui, avec le radar, avait aussi connu des réalisations nombreuses dans toutes les Armes.

Les sujets de Conférences et d'expériences ne manquaient donc pas — tandis que, précédée et annoncée par ces « éclaireurs » qu'avaient été les diodes à cristal, détectrices et changeuses de fréquence des radars, l'immense armée des semiconducteurs allait bientôt, en bataillons serrés, commencer à apparaître à l'horizon...

DEUXIÈME PARTIE *

— 1944 à 1971 —

● 25 novembre 1945 : dans l'enceinte de la Sorbonne, M. DELORAINE en uniforme américain de « Scientific Adviser » redémarre l'activité de la Société par une conférence sur « Le rôle de la recherche dans le domaine de la Radioélectricité ». Il évoque, avec les limitations imposées par la guerre qui continue, les progrès réalisés dans les systèmes de communication, de radiodiffusion et de navigation aérienne et maritime. Au cours des années suivantes, la paix revenue, de brillants conférenciers feront des exposés de synthèses détaillées : WATTSON WATT, conférencier invité, donne les caractéristiques principales des Radars dont tous les détails vont être révélés par la célèbre collection du MIT. M. BESSON expose la théorie de la Modulation de Fréquence qui, combinée avec l'emploi de fréquences porteuses UHF, ouvre le domaine des communications radiotéléphoniques, des faisceaux hertziens et de la radiodiffusion-télévision. En 1946, le 25e anniversaire de notre Société est marqué par la très belle exposition du Palais de la Découverte, où figurent déjà des démonstrations de télévision 819 lignes et de faisceaux hertziens, avec la participation de 37 000 visiteurs. En 1950, sous la présidence de M. PONTE, se tiennent simultanément le Congrès de radioélectricité et d'électronique à la Maison de la Chimie et une Exposition des nouveaux matériels à l'Exposition de Versailles. La même année, une série de conférences en Sorbonne des directeurs et ingénieurs de l'Armement donne l'état des progrès obtenus en matière de radiocommunications, détections électromagnétiques et navigation dans les Armées.

De 1945 à 1950, pendant les cinq années de son mandat de Secrétaire Général, Roger RIGAL a transformé la Société. Nommé Président de la Société en 1956, il devait disparaître prématurément l'année suivante, regretté de toute l'équipe d'ingénieurs qu'il avait groupée autour de lui et qui a continué, après sa disparition, à développer l'action de la Société et son rayonnement international, sans en changer fondamentalement le caractère.

● En 1960, la Société prend son nom actuel de « Société Française des Electroniciens et des Radiotélectriciens » officialisant ainsi l'importance de l'électronique dont l'apparition des transistors en 1948 a permis un développement foudroyant.

● De 1948 à 1965, le nombre de Membres de la Société a quadruplé, passant de 1 000 à 4 000, la revue l'*Onde Electrique*, qui a doublé de format en 1945, triple le volume des textes publiés en éditant des numéros spéciaux sur les sujets d'actualité et, depuis 1965, bénéficie de l'appui de la DGRST pour publier des articles de fond et des fiches techniques issus des travaux de cet organisme. Les conférences générales sur les sujets cèdent progressivement la place à des demi-journées d'études plus spécialisées, qui attirent un nouveau public de jeunes ingénieurs. Les Sections d'étude créées au nombre de 7 en 1945 et devenues 12 en 1960, sont animées par des Présidents à qui la Société délègue l'organisation des conférences, visites, rapports avec les Sociétés-Sœurs, et, d'une façon générale, toute l'animation de leur secteur d'activité. Pour soutenir la décentralisation de l'électronique en province, des groupes régionaux responsables des conférences, visites et manifestations locales, ont été créés dans les principales régions, le premier groupe à Grenoble en 1950, le huitième et le plus jeune, en 1965, à Toulouse. Mais la manifestation la plus importante de l'activité de la Société est le Congrès de la Société, qui devient annuel à partir de 1953 et rassemble près d'un millier d'auditeurs, dont la moitié venus de l'étranger, sur des thèmes qui se répètent, avec des variantes, tous les 4 à 6 ans : Electronique Nucléaire, Tubes et Circuits en hyperfréquences - Télévision - Informatique - Microélectronique - Espace. Organisés à partir de 1961, en général avec le concours de la Fédération Nationale des Industries Electroniques qui apporte l'appui de son organisation et de ses finances, ils se déroulent traditionnellement au Palais de l'UNESCO, emplacement de standing international possédant plusieurs grandes salles de conférences dotées de moyens de traduction simultanée.

Mais depuis quelques années une nouvelle évolution se dessine. A la suite de la fusion intérieure, le 31-12-62 entre les deux Sociétés des ingénieurs Radioélectriciens et des ingénieurs Electriciens des USA, groupant, l'une 100 000 électroniciens, l'autre 50 000 électriciens, les membres de notre bureau s'interrogent sur la taille, somme toute insuffisante, d'une Société de 4 500 membres, et sur l'intérêt que

* Cette partie est due à M. R. CABESSA.

présente la fusion avec la Société-sœur la « Société Française des Electriciens ». Initialement créées avec des objectifs complémentaires, les deux Sociétés savantes SFE et SFER ont vu, dans les dernières années, du fait de l'évolution rapide des sciences et des techniques concernées, certains de leurs domaines se toucher, puis se recouper (physique du solide, électronique nucléaire, commande automatique), justifiant une fusion pour éviter les doubles emplois. Démarrées en 1964 par un « Comité des sages » réunissant d'anciens présidents des deux Sociétés, les études en vue de la fusion ont abouti le 1er janvier 1971 au vote par l'Assemblée Générale d'une résolution approuvant le principe de la fusion SFE/SFER et engageant une procédure qui devrait normalement conduire les deux Sociétés à n'en former qu'une avant la fin 1971. Nous souhaitons que cette rénovation des structures qui peut être suivie d'autres rapprochements avec des Sociétés travaillant dans les mêmes domaines, apporte ainsi une nouvelle jeunesse à la Société et augmente son audience et sa représentativité internationale pour tout le domaine de la profession électrique, radioélectrique et électronique.

ENQUÊTE STATISTIQUE SUR LES MEMBRES DE LA SFER

Au cours des réunions du second semestre de 1970, le Bureau a regretté, à plusieurs reprises, de ne pas disposer de renseignements précis sur la répartition des membres de la Société suivant divers caractères statistiques tels que l'âge, la formation, le domaine d'activité, etc.

A l'initiative de l'Ingénieur Général LIBOIS, alors Président, le Secrétariat, profitant de la réédition de l'annuaire pour 1971, a envoyé à tous les membres de la SFER des fiches de renseignements plus complètes que d'habitude et grâce auxquelles une statistique portant sur environ 2/3 de réponses a pu être établie.

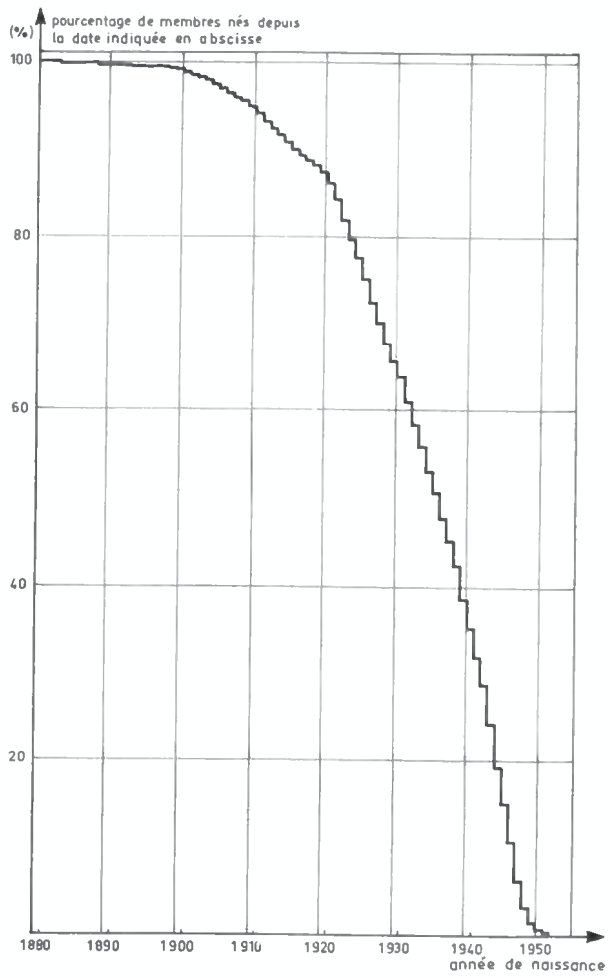
Grâce au Président LIBOIS nous avons pu bénéficier de l'assistance du Centre de calcul du CNET, tant pour l'écriture des programmes que pour la « mise en cartes perforées » de nos membres et l'exploitation statistique a été faite par le calculateur BGE 600 de cet organisme.

Il nous a semblé qu'à l'occasion du cinquantenaire de la Société, il serait intéressant de publier les principales conclusions de l'enquête. Il est bien entendu que celles-ci concernent les membres de la SFER et non les lecteurs de *L'Onde Électrique*.

Pour chaque membre, les données suivantes : nom, année de naissance, année d'inscription à la SFER, diplômes universitaires, lieu de travail, employeur, fonction, secteur d'activité, ont été consignées.

1. Age des membres de la SFER

La répartition cumulative des membres en fonction de l'âge est donnée sur la figure. Presque 1/3 ont moins de 30 ans, la moitié moins de 35, les 2/3 moins de 40. La Société est jeune.



Exemple de lecture de ce graphique : 40 % des membres de la SFER sont nés après 1938.

2. Répartition géographique du lieu de travail

La région parisienne (Paris et les anciens départements de la Seine, Seine-et-Oise) regroupe, comme on pouvait s'y attendre, la majorité des membres : 64 %. Les autres sont répartis à l'étranger (4 %) et dans les autres départements français, parmi lesquels le département du Nord (5 %), l'Isère (3 %), le Rhône, la Haute-Garonne, les Côtes-du-Nord, la Gironde (chacun 2 %). On reconnaît là les principaux centres universitaires ou industriels.

3. Formation des membres

Chaque membre pouvait indiquer sur la feuille de renseignements un à trois diplômes différents, d'où des recouvrements évidents. On constate que 35 % ont des diplômes universitaires :

— licenciés : 20 %
— docteurs : 14 %
— agrégés : 1 %

La grande majorité sort d'une école d'ingénieurs. Les plus fréquentes sont :

— Ecole Supérieure d'Electricité : 21 %
— Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications : 16 %
— Ecole Polytechnique : 8 %

4. Fonction et secteur d'activité

Concernant l'activité des membres, on a indiqué deux caractères : le secteur (fonction publique, secteur publique, secteur nationalisé et secteur privé) et le genre d'activité (étudiants, enseignants, chercheurs, techniciens, ingénieurs d'études, ingénieurs de direction, etc.). On peut noter sur le tableau qui donne la répartition en fonction de ces deux caractères que plus de la moitié des membres fait partie du secteur privé et que la moitié des membres a une activité de direction ou est ingénieurs d'études.

Cette enquête a permis d'obtenir un premier profil statistique des membres de la SFER. Elle nous aidera à préciser les actions propres à augmenter notre rayonnement et l'audience de notre organe, *L'Onde Électrique*.

Qu'il nous soit permis de remercier en votre nom le Président LIBOIS pour le grand service qu'il a rendu à la Société.

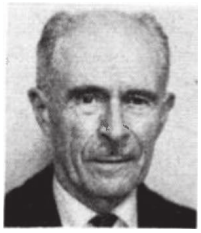
Répartition des membres de la SFER à la fin de 1970 par genres et secteurs d'activité

Genres d'activité et pourcentage correspondants / Secteurs d'activité et pourcentages correspondants		Direction	Tech.-comm.	Gestion brevets	Fabr. exlpt.	Ing. études	Technicien	Chercheur	Enseignant	Etudiant	Divers	Retraité
		17,3	4,5	2,6	3	32,5	3,2	8	9,5	12,5	5,5	1,4
Fonctionnaires	18,6	18	0,5	4	0,5	13	3	12,5	42	1	1,5	4
Secteur public	15,2	10	1,5	3	1,5	34	4	26	5	15	0,5	0,5
Secteur nationalisé	5,7	11	0	5	5	51	6	15	1	1	2	2
Secteur privé	53,5	22	7,5	2,5	4,5	40	3	2	2	15	0,5	1
Autres secteurs	7	0	3	0	0	11	2	13	0	32	39	0

P. BESSON

Ingénieur Général des Ponts et Chaussées Ancien Président de la SFER

P. DAVID



Ingénieur Général des Télécommunications Ancien Président de la SFER

B. DECAUX

Ingénieur en Chef des Télécommunications Membre de l'Académie des Sciences Ancien Président de la SFER

R. PLANIOL

Ancien collaborateur de Henri Abraham

A la mémoire de Gustave Ferrié et de Henri Abraham

En 1968, ont été commémorés les centenaires de la naissance de deux pionniers de la radioélectricité en France : le Général Gustave Ferrié (mort en 1932) et le Professeur Henri Abraham (mort en 1943, en déportation).

Diverses cérémonies officielles, une exposition à l'ORTF, des réunions militaires et universitaires, leur ont été consacrées, rappelant leur rôle dans le développement d'une technique d'importance nationale et internationale.

La Société Française des Electroniciens et des Radioélectriciens, précisément fondée par eux en 1921 (sous son premier nom de « Société des Amis de la TSF ») — et sa revue « *L'Onde Electrique* » (dont la présentation a changé, mais non le titre) se devaient, bien entendu, d'évoquer aussi leur souvenir et de leur apporter le témoignage de gratitude des générations de radioélectriciens auxquelles ils ont transmis le flambeau.

Nous le faisons ici, sous un angle légèrement différent. Il nous semble, en effet, que les articles qui leur ont été consacrés ont mis principalement l'accent sur les services rendus par ces deux éminentes personnalités dans la période initiale de « défrichage » du domaine radioélectrique (1900-1914), puis dans la période critique de la guerre (1914-1918), où les applications militaires primaient tout le reste.

Il nous a donc paru opportun de mettre en relief la dernière période de leur activité, peut-être moins spectaculaire que les premières, mais qu'il serait impardonnable de sous-estimer : celle de la « reconversion » aux applications pacifiques, scientifiques, industrielles, à la navigation maritime et aérienne ; celle de la formation de spécialistes, des échanges d'informations techniques, de la collaboration entre les différents services et des accords internationaux à l'échelle mondiale.

Nous présenterons donc d'abord un tableau d'ensemble évoquant l'atmosphère de la Radioélectricité pendant la dernière époque de leur vie. Puis nous rappellerons le rôle du Général Ferrié dans les grandes organisations internationales. Enfin, quelques notes rédigées par M. Planiol, l'un des collaborateurs du Professeur H. Abraham, exposeront certains de ses travaux en radioélectricité.

La guerre de 1914 avait été l'occasion de réunir, autour de Ferrié, une équipe de spécialistes (on dirait aujourd'hui : de « chercheurs ») pour mettre au point une nouvelle « famille » (on dirait aujourd'hui « génération ») de matériels « de TSF » utilisables aux Armées, à terre, en mer et en l'air. On était alors talonné par l'urgence des réalisations immédiates ; il fallait courir au plus pressé, se débrouiller avec les moyens disponibles ; les impératifs de vitesse et d'application pratique immédiate primaient tout le reste. Si l'on comprenait mal certains points, tant pis ; on ne pouvait s'attarder aux explications théoriques, non plus qu'aux analyses scientifiques de phénomènes complexes. D'autre part, les « tubes à vide », uniquement triodes, venaient de faire leur apparition dans l'industrie, et il était souhaitable et urgent de ne pas négliger les nouvelles possibilités qui s'offraient ainsi à la TSF.

Avec la paix revenue, l'atmosphère change ; ces difficultés disparaissent ; mais d'autres surgissent. Les équipes, constituées sous le signe de l' « Union Sacrée » se dispersent ; chacun reprend son activité propre, avec un légitime désir de s'en réserver le bénéfice. La reconstruction des zones dévastées, la reconversion de l'industrie absorbent l'attention et les moyens disponibles ; les crédits militaires pour la « recherche » disparaissent (« il n'y aura plus de guerres »).

(*) Ces lignes sont dues à MM. P. Besson, P. David et B. Decaux, anciens Présidents de la SFER.

Ferrié, Abraham, et quelques-uns de leurs collaborateurs, ne se découragent pas et voient plus loin ; ils veulent poursuivre leurs efforts dans de nouvelles voies. Tant de choses sont encore mal comprises... dans cet inconnu, se cachent sans doute, bien des découvertes intéressantes. Jusqu'où pourra-t-on pousser l'amplification obtenue avec les premiers tubes ? Jusqu'à quelle limite supérieure pourra-t-on étendre le domaine des fréquences utilisables ? Et comment les ondes correspondantes se propageront-elles ? Sera-t-il possible d'améliorer les procédés de radio-guidage, de multiplier les postes portatifs, de développer la radiotéléphonie, et même peut-être une certaine « radio-diffusion » ? (1) Et l'on entrevoit toutes sortes d'autres applications aux mesures, à la petite mécanique, à la chronométrie, à la géodésie, à la géographie, etc., voire à l'amélioration des liaisons *sur fil*.

Ferrié s'applique donc à conserver soigneusement les liens officiels et les amitiés nouées pendant la guerre avec les différents services, avec l'industrie, avec l'étranger. Dans son bureau défilent les visiteurs de marque, se réunissent les Commissions chargées d'établir les projets ou les « cahiers des charges ». Il arbitre les différends, il apaise les querelles. Il lance l' « *Union Radio-Scientifique Internationale* » (dont il est nommé Président). Il développe la « Section Radio » de l'Ecole Supérieure d'Electricité, qu'il a créée en 1912. Il reconstitue autour de lui une petite équipe de recherche, dans les misérables locaux de la Radiotélégraphie Militaire, aux Invalides (dont la pauvreté scandalise les étrangers de passage) ; il trouve même le moyen d'y héberger les « Manipulations » de la Section Radio de l'Ecole Supérieure d'Electricite (2). Il encourage, avec une sympathique compréhension, les initiatives et le zèle des jeunes amateurs et leur prête son concours pour leurs « Essais Transatlantiques ».

Abraham, de son côté, reprend, au Laboratoire de l'Ecole Normale Supérieure, toutes sortes d'ingénieuses expériences qui encouragent les générations de jeunes physiciens à se pencher sur les mystères des « très hautes fréquences ».

Tous deux, avec quelques amis de la première heure, dont l'éditeur Chiron, fondent la « *Société des Amis de la TSF* » et lancent sa revue « *L'Onde Electrique* », dont l'intérêt et la vitalité s'affirment dès les premiers numéros et n'ont cessé de croître. Il n'est que de feuilleter sa collection pour y retrouver toute l'histoire de la Radioélectricité et les étapes de son développement :

— perfectionnement des émetteurs et des récepteurs ;

— étude de l'ionosphère et découverte des curieuses lois de propagation qui en résultent (zones de silence, choix des ondes favorables pour les liaisons à très grande distance, etc.) ;

— amélioration des systèmes de guidage et autres artifices pour la sécurité des navigateurs ;

— méthodes et appareils de mesures nécessaires pour préciser les mérites des équipements, exiger et vérifier leurs performances, imposer des règles d'exploitation, lutter contre le désordre, les brouillages mutuels et la « loi de la jungle » qui tendait à s'installer.

A ce travail considérable, Ferrié, Abraham, ont largement contribué. Certes, les résultats qu'ils avaient acquis sont aujourd'hui largement dépassés ; on a fait beaucoup mieux depuis. Mais il n'est que juste de comparer aussi le changement d'échelle entre les moyens dont ils disposaient, et ceux actuels de l'Electronique : nombreux laboratoires luxueusement équipés, puissante industrie et, de toutes parts, Comités de Prospective et de Coordination.

LE GÉNÉRAL FERRIÉ ET LES RÉUNIONS INTERNATIONALES DES RADIOCOMMUNICATIONS

Une technique qui se développe avec autant de rapidité, et dans un domaine aussi nouveau que celui concernant la télégraphie sans fil ne pouvait manquer de poser aux divers pouvoirs publics — et sur le plan international comme sur le plan national — de difficiles et délicats problèmes d'organisation et de réglementation.

A vrai dire, les premiers pionniers de la TSF n'avaient pas ressenti de gêne importante à cet égard, car les stations étaient alors peu nombreuses, et une assez grande liberté pouvait régner, par exemple dans le choix des longueurs d'onde (on ne parlait pas encore de fréquences, du moins dans ce cas).

Mais, à partir de 1918, les développements intervenus, l'augmentation considérable du nombre des stations, l'apparition de nouveaux services, comme ceux de l'aviation, puis, bientôt, celui de la radiodiffusion, la valeur reconnue aux ondes décamétriques à la suite des résultats obtenus par les « amateurs », obligèrent à élaborer des règlements internationaux susceptibles d'être ratifiés par la plupart des pays intéressés. La préparation des projets de ces règlements, ou de ces avis techniques, sur le plan national, comme l'organisation interne française des radiocommunications, nécessita donc, tout d'abord, la réunion de diverses Commissions ou Comités interministériels, et l'on peut dire que c'est unanimement que les Ministres intéressés s'accordèrent pour en confier la Présidence au Général Ferrié. Et lorsque, ensuite, l'accord sur certaines propositions ayant été réalisé, une Délégation française se rendait à la réunion internationale qui devait en débattre (Conférence Internationale des Radiocommunications, Réunion du Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR), etc.), c'était encore, tout naturellement, le Général Ferrié qui en prenait la Direction.

(1) Tout en respectant scrupuleusement, bien entendu, le monopole du Gouvernement, rappelé avec insistance par BROIN (*Onde Electrique*, avril, mai, juin, juillet 1922).

(2) Ces manipulations s'effectuaient à partir de vieux matériel militaire récupéré, à base d'« alternateurs Y », dont les puissantes émissions en ondes amorties donnaient aux expérimentateurs des laboratoires voisins une occasion inespérée d'étudier les dispositifs anti-brouillage.

Dans ce rôle délicat, le Général excellait, et il ne cherchait d'ailleurs pas à dissimuler la satisfaction — et la fierté très justifiée et bien légitime — qu'il éprouvait à se présenter, au nom de la France, devant les Délégations des autres pays participants. A sa connaissance approfondie des questions techniques ou administratives posées, il joignait des qualités de négociateur qui auraient pu faire de lui un excellent diplomate, un sens de la mesure et de la répartie, dans laquelle il savait doser à merveille la rigueur, la fermeté quand elle était nécessaire, mais aussi parfois l'humour. Il possédait une rapidité de réflexion qui lui permettait de saisir d'une manière presque instantanée les raisons profondes du raisonnement de tel ou tel contradicteur, et aussi ses points faibles, qu'il était dès lors prompt à souligner, mais toujours avec courtoisie.

Les français — délégués civils ou militaires — qui accompagnaient le Général dans ces réunions se rendaient aisément compte qu'aux yeux des étrangers — et aussi des étrangères, épouses ou filles de Délégués, qui prenaient part aux « Distractions » des Conférences, c'est-à-dire aux excursions du dimanche, aux dîners, aux bals, etc. — il symbolisait un certain « Français modèle », à la culture très vaste, à l'esprit aiguisé, à la conversation passionnante. Lors des dîners officiels, on recherchait son voisinage, car on était sûr de ne pas s'ennuyer et d'emporter, de la soirée, des souvenirs attachants, des anecdotes pittoresques et des sujets de réflexion. Et si, par tradition, dans certains pays, un bal devait suivre, il était le premier à inviter sa voisine, tandis que beaucoup de Délégués plus jeunes enviaient son charme, son habileté et sa résistance à la fatigue.

Toutes ces qualités lui avaient fait acquérir, sur le plan international plus peut-être encore qu'en France, une véritable autorité, qui servait admirablement les points de vue qu'il avait mission de défendre. Que de fois, d'ailleurs, au cours d'une séance de travail, des Délégués, devant la difficulté d'arriver à résoudre un problème délicat, se mettaient-ils du moins d'accord pour demander « l'arbitrage du Général » — et il était inutile de préciser de quel Général il s'agissait. Très conscient de la valeur de cette autorité, il estimait justement qu'elle devait être conservée, dans l'intérêt supérieur de notre Pays, qu'il ne fallait pas risquer de l'amoindrir en en abusant, qu'il convenait, au contraire, de la conserver intacte pour le jour où des questions vraiment importantes, difficiles et délicates seraient débattues, et qu'il valait mieux ne pas intervenir lui-même dans certains débats, dont l'orientation, au fond, importait peu. *De minimis non curat praetor...*

C'est ainsi, et beaucoup grâce à lui, que la France obtint des satisfactions appréciables aux réunions internationales de Washington (1919 et 1927), puis aux séances du CCIR de La Haye (1929) et de Copenhague (1931). Simultanément, il siégeait aussi aux sessions de l'Union Radioscientifique Internationale, qu'il avait fondée, et qui reprenait, en les développant, les tâches de l'ancienne Commission Internationale de Télégraphie sans fil Scientifique. Celle-ci avait été créée à Bruxelles en 1913. Elle réunissait les spécialistes mondiaux de ce domaine tout nouveau. En 1914, cette Commission se réunit au Château Royal de Laeken pour étudier divers problèmes et organiser des expériences. Dans le numéro 1 (et dernier, hélas !) de son Bulletin, daté de juin 1914, figure une photographie représentant les délégués présents, les deux délégués de la France étaient justement le Commandant Ferrié et Henri Abraham. En 1919, cette Commission ressuscita sous le nom d'Union Radio-Scientifique Internationale et le Général Ferrié en fut élu Président. Il lui imprima une vigoureuse impulsion et la dirigea avec sa maîtrise coutumière, jusqu'à sa mort. Dans ce cadre encore, il évoluait avec aisance parmi les savants venus des divers pays adhérents, et il était très écouté.

Une autre circonstance, enfin, contribuait, au cours des Conférences Internationales, à parfaire, autour de lui, et partant, autour de la Délégation française, une atmosphère de chaude cordialité, qui nous était si bénéfique, et qu'il tenait beaucoup à développer. Nombreux en effet étaient, parmi les Délégués militaires ou civils représentant les autres nations, ceux qui, quelques années plus tôt, avaient été détachés par leur Gouvernement pour suivre, à Paris, les cours de la Section de Radiotélégraphie de l'Ecole Supérieure d'Electricité, créée par le Général en 1912 et dont il assurait la Direction des Etudes. C'était, entre autres, le cas de beaucoup d'espagnols, de polonais, de portugais, de roumains, de tchécoslovaques..., qui, ayant été les élèves du Général Ferrié, lui avaient gardé une profonde et respectueuse reconnaissance. Ils écoutaient volontiers ses conseils. La tradition s'était même établie de l'organisation, au cours de chaque Conférence, d'un dîner offert au Général par ses anciens élèves étrangers, dîner auquel ceux-ci invitaient également les Délégués français, anciens élèves de l'Ecole. Ceux qui ont eu la chance de participer à ces réunions ont

gardé un souvenir particulièrement ému de l'atmosphère cordiale qui y régnait, et du soin avec lequel était rédigé, en commun, le texte d'un télégramme qui, traditionnellement aussi, était envoyé à Paris au Directeur de l'Ecole, alors le regretté Paul Janet.

Au cours de la Conférence de Washington (1927), un Règlement Général des Radiocommunications, d'ailleurs encore un peu rudimentaire, avait été mis au point et avait été ratifié par un assez grand nombre de pays. Mais les développements de la radioélectricité, la naissance des services télégraphiques et téléphoniques sur ondes décamétriques, l'avènement de la radiodiffusion, l'importance accrue des systèmes de guidage radioélectrique tant pour les navires (radiophares maritimes — radioalignements) que pour l'aviation, nécessitaient impérieusement sa révision, au cours de laquelle on devait d'ailleurs s'appuyer, en tant que de besoin, sur les avis techniques émis par le CCIR. C'est ainsi qu'il fut décidé de procéder à une refonte complète du Règlement au cours d'une Conférence qui devait s'ouvrir en août 1932, à Madrid.

Pour préparer les propositions françaises, une Commission Interministérielle fut constituée, fin 1931, évidemment sous la présidence du Général Ferrié. Le sort voulut qu'il ne put que faire commencer les travaux, et sa disparition, en février 1932, rendit beaucoup plus difficile leur bonne continuation. Lorsque la Conférence s'ouvrit à Madrid, c'est unanimement que les Délégations étrangères rendirent hommage à sa mémoire. Que de fois, au cours des années qui suivirent, les Français délégués dans les réunions internationales regrettèrent-ils de n'avoir plus à leur tête celui qui avait tant fait pour le développement de la télégraphie et de la téléphonie sans fil, et qui jouissait, dans les milieux internationaux, d'une admiration et d'une sympathie qui, dans le domaine dont il s'agit ici, contribuaient encore à rehausser le prestige de notre pays !

QUELQUES ASPECTS DE L'ŒUVRE DE HENRI ABRAHAM *

1. Les communications par radio à grandes distances

Vers 1920, aidé du jeune Planiol qui fait ses débuts dans la recherche, H. Abraham entreprend la réalisation d'un ensemble destiné à l'enregistrement mécanique des signaux des grands émetteurs américains.

Tout le monde utilise alors la simple hétérodyne (pour créer la note musicale écoutée à l'oreille) ou la super-hétérodyne (encore en usage aujourd'hui) ; la méthode d'Abraham ne comporte la création d'aucune fréquence locale. L'onde reçue est amplifiée en haute fréquence et détectée, fournissant ainsi un courant continu qui suit la cadence du manipulateur de l'émetteur. Ce courant, convenablement amplifié par l'ampli à courant continu, actionne la plume du magnéto-oscillographe écrivant le message sur la bande de papier.

Pour appliquer cette nouvelle méthode à la réception des arcs de Poulsen qui, vers 1920, sont la principale source des grandes stations émettant à travers l'Atlantique, les circuits oscillants du poste récepteur doivent éliminer l'onde émise pendant les intervalles séparant les signaux Morse. Or, sur le poste d'Annapolis, les deux ondes ne diffèrent que de 80 Hz, intervalle beaucoup trop petit pour être décelé par des circuits normaux. Henri Abraham développe un nouveau type permettant d'obtenir le résultat cherché. Il le baptise « circuit à résonance suraiguë » : chaque circuit (le montage en comporte généralement deux en cascade) est accompagné d'une lampe. Dans la plaque, une bobine peut être couplée inductivement avec la self principale du circuit de réception. Un réglage précis mais parfaitement stable élimine presque toute la résistance ohmique du circuit et le « Q » monte aux environs de 1 000. Avec une aussi grande valeur, quand l'accord est réalisé sur l'onde utile, l'autre, qui en diffère seulement de 80 Hz, est complètement éliminée et l'hétérodyne devient inutile, la détection passant directement de la haute fréquence au courant continu.

L'ensemble est, une fois de plus, d'une admirable simplicité : le circuit d'entrée comprend le grand cadre de réception placé dans le jardin. Il comporte quatre spires de 50 × 4 m. Le bas est à 4 m du sol. Son orientation est-ouest le rend apte à l'écoute des grands émetteurs américains d'Arlington (NAA) et Annapolis (NSS). Ce premier circuit (possédant sa lampe spéciale de « résonance suraiguë ») attaque la grille d'une lampe dont la plaque est couplée par une induction réglable avec un deuxième élément identique (mais, naturellement, ne comprenant plus le grand cadre), celui-ci commande l'entrée d'un ampli HF à quatre étages dont la dernière lampe montée en détectrice, attaque l'ampli à courant continu. La sortie fait écrire le magnéto-oscillographe sur la bande.

Aucun phénomène de battement n'est utilisé.

Quand les parasites ne sont pas trop violents, ce montage fournit d'excellentes inscriptions des grands émetteurs américains et, en particulier, des signaux horaires de NSS qui peuvent ainsi être comparés aux horloges directrices de l'Observatoire de Paris.

Un peu plus tard, Henri Abraham porte de un à quatre le nombre de lampes HF intercalées entre les deux circuits résonnants, la quatrième lampe n'étant pas montée en détectrice. Il en résulte une augmentation considérable de la sensibilité. Elle permet une réduction spectaculaire du cadre de réception. Ses dimensions, qui étaient 50 × 4 m, tombent à un carré de 18 cm de côté, le nombre des spires étant porté de 4 à 50. La surface totale descend de 800 m² à moins de 2 m².

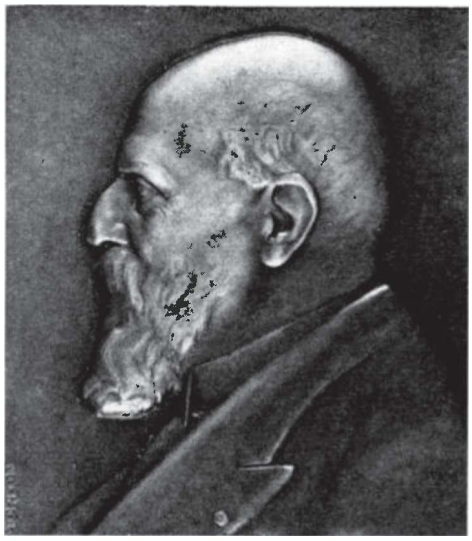
La sensibilité d'un tel système est si grande qu'il est essentiellement instable et se met à osciller dès l'allumage des lampes. Mais l'étude, quelques années plus tôt, des oscillations des amplis, qui a conduit à la géniale découverte du multivibrateur, permet à

(*) Ces souvenirs sont extraits de la notice publiée par le Comité du Centenaire de la naissance d'H. Abraham, avec l'aimable autorisation de M. R. Planiol et du Comité.

Henri Abraham de maîtriser immédiatement cette grave difficulté : le petit cadre de 18 cm de côté, orienté vers l'Amérique comme le grand, demeure seul exposé au champ magnétique de l'onde. Les deux bouts de l'enroulement pénètrent dans une première cage de Faraday soigneusement mise au sol. Elle contient le premier circuit résonnant et le premier ampli HF, sans détection. La sortie de celui-ci pénètre dans une deuxième cage, également au sol, où se trouvent le deuxième circuit à résonance suraiguë et le deuxième ampli HF dont la dernière lampe est montée en détectrice. Le courant continu ainsi obtenu passe dans des filtres qui le débarrassent de toute composante HF avant que, sortant de la deuxième cage, il ne vienne attaquer la grille d'entrée de l'ampli à courant continu dont la plaque de sortie agite la plume sur le papier.

Ce remarquable ensemble, parfaitement stable, comporte douze étages d'amplification en cascade (huit HF, quatre courant continu) et deux circuits à résonances suraiguës.

La f.é.m. induite par l'onde reçue dans le petit cadre est de l'ordre du nanovolt. A la sortie, l'oscillographe à plume est alimenté sous une quarantaine de volts. L'amplification totale atteint environ 4.10^{10}. Une si étonnante sensibilité est totalement inconnue à l'époque (1921). Quarante-sept ans plus tard, elle n'est encore que très rarement atteinte et témoigne ainsi des extraordinaires qualités d'expérimentateur d'Henri Abraham.



2. Les émetteurs Diplex

Dans les années 20, la plupart des émetteurs servant aux communications à grandes distances sont les arcs de Poulsen. Ils sont allumés en permanence. Le manipulateur met en court-circuit une faible partie de la self changeant un peu la fréquence qui passe de F_1 pendant les signaux à F_0 dans l'intervalle qui les sépare.

Les récepteurs emploient une hétérodyne et le lecteur au son doit distinguer entre deux notes assez voisines.

Henri Abraham développe l'originale méthode de réception dite « à résonance suraiguë » décrite dans le chapitre précédent. Elle le conduit à une nouvelle idée permettant de transmettre deux messages à la fois avec un seul émetteur. Le poste est doté non plus d'un seul, mais de deux manipulateurs. Entre les signaux la fréquence est F_0 le premier manipulateur la fait passer de F_0 à F_1, le deuxième de F_0 à F_2. Enfin si les deux sont abaissés en même temps, elle devient F_3. En général ces quatre fréquences sont à peu près en progression arithmétique.

L'émetteur est écouté non plus par une seule, mais par deux stations pouvant être au même endroit ou dans des lieux différents. Chacune est équipée de deux circuits. La première reçoit F_1 et F_2, la deuxième F_1 et F_3 et les deux messages sont émis et reçus indépendamment l'un de l'autre.

Pour le distinguer des classiques communications en duplex, Henri Abraham appelle ce procédé « émission en diplex ».

3. Les télégraphes imprimants

Vers 1922, un peu aidé par le jeune Planiol, fort heureux d'être à côté d'un tel maître, Henri Abraham vient de mettre au point l'inscription mécanique des signaux radio à grandes distances.

Dans ces années les télégrammes sont toujours transmis sur les lignes télégraphiques par des appareils Baudot. La vitesse de transmission est de dix mille mots par heure, à peu près dix fois la valeur atteinte par les meilleurs lecteurs au son. Une telle cadence rentre exactement dans les possibilités de la méthode de réception d'Abraham : il suffit de mettre à la sortie de l'amplificateur à courant continu un relais Baudot, rebobiné en fil fin pour adapter son impédance aux lampes de sortie qui ont une résistance interne plus élevée que les lignes télégraphiques.

Henri Abraham soumet cette brillante idée à l'Administration des PTT qui accorde aussitôt son concours : un ensemble Baudot complet arrive au laboratoire, accompagné d'un agent manipulateur.

La ligne télégraphique reliant toujours l'émetteur au récepteur est coupée. Le clavier d'émission commande un oscillateur local. Un petit cadre reçoit l'onde émise qui agit sur le récepteur dont l'ampli à courant continu fait marcher le relais Baudot, suivi de toute l'installation réceptrice qui n'a subi aucune modification.

Dès le début, c'est le succès, le message passe aussi bien que si la ligne n'avait pas été coupée.

Abraham sollicite une nouvelle aide de son ami le général Ferrié et des PTT.

Un émetteur, puissant pour l'époque, est installé au laboratoire de l'ENS : deux lampes de 250 W chacune, montées en push-pull, attaquent une antenne tendue au-dessus de la cour intérieure du bâtiment principal de l'Ecole. Les moyens matériels fort limités ne permettent pas d'élever la nappe d'antenne à plus de 2 m au-dessus du toit. La fréquence est de 150 kHz.

L'installation Baudot complète reste auprès de l'émetteur : elle ne sert plus qu'à contrôler l'onde émise.

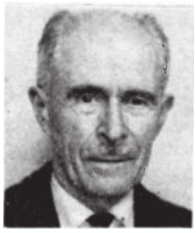
Le jeune Planiol est envoyé à 150 km de Paris, à Nogent-le-Rotrou, où se trouve une caserne du 8e Génie, qui dépend du général Ferrié. Il y arrive en compagnie d'un cadre récepteur de 1,20 m de diamètre, d'un jeu complet d'amplificateurs, d'une

deuxième installation Baudot et d'un agent des PTT chargé d'en assurer la bonne marche.

Le relais Baudot, à la sortie des amplificateurs, est dédoublé, l'un commande les appareils imprimeurs placés à Nogent, l'autre une ligne directe qui relie la caserne du 8e Génie à l'ENS et agit sur un récepteur Baudot classique. Ainsi Abraham dispose de deux ensembles placés côte-à-côte : le premier contrôle l'onde émise, le deuxième reçoit le message qui est allé de Paris à Nogent par radio avant de retourner par fil de Nogent à Paris.

Cette expérience est, en quelque sorte, historique puisqu'elle est la première liaison établie par radio entre deux télégraphes imprimants. Répétée devant le sous-secrétaire d'Etat chargé des PTT à l'époque, elle fait quelque bruit et apporte une nouvelle preuve des qualités d'expérimentateur hors de pair d'Henri Abraham.

P. DAVID



Ingénieur Général des Télécommunications
Ancien Président de la SFER

G. LEHMANN

Directeur Scientifique à la CGE
Ancien Président de la SFER

La théorie des télécommunications

Lors de son apparition, en 1921, *l'Onde Electrique* se proposait de couvrir un domaine bien défini : celui de la Radio-Electricité. Or, en un demi-siècle, ce domaine s'est beaucoup élargi. Non seulement en ce qui concerne la gamme d'ondes utilisables ; mais aussi parce qu'aux messages télégraphiques se sont ajoutées successivement la transmission de la parole, de la musique, des images fixes et animées, celle des données numériques, la goniométrie, l'interception, la radionavigation et la détection (radar).

Cette technique s'est aussi beaucoup rapprochée de celle des liaisons sur fil, d'où le nom plus général de *Télécommunications* ([1]).

Le développement de cet immense domaine peut être attribué à la conjugaison de trois facteurs étroitement imbriqués ([2]) :

— l'imagination des inventeurs ;

— la patience des expérimentateurs ;

— les développements théoriques des mathématiciens et physiciens.

Nous nous proposons de passer rapidement en revue les phases essentielles de ces progrès, en soulignant leur interdépendance et en observant, à l'occasion, que certaines idées, réputées ultra-modernes, avaient été émises depuis longtemps par quelques pionniers, auxquels il est juste de rendre hommage.

Les problèmes de télécommunication

Dès l'origine, on a rêvé de réunir les qualités suivantes :

— *vitesse de transmission* (passée de quelque 1 200 mots/h à des milliers de « bits/s ») ;

— *sécurité :* ni « lacunes », ni « erreurs » ; si l'on se contentait, au début, d'un taux d'erreur de quelques 10^{-2} par caractère, on parle maintenant de 10^{-6} et parfois de 10^{-12} ([3]) ;

— *économie de puissance et de matériel* (voir engins spatiaux).

La réalisation de telles performances soulève les difficultés suivantes :

D'abord, les imperfections des voies de communication :

— *bande passante limitée* (avec irrégularités et déphasage) ;

— *affaiblissement* variable dans le temps, interruptions, coupures ;

— *perturbations additionnelles* (bruit, parasites...).

La première domine toute discussion : les « voies de communication » habituelles sont (plus ou moins) assimilables à des « filtres », de bande passante bien définie B (ou W, ou ΔF), et par suite ne peuvent transmettre correctement de signaux plus brefs qu'une certaine durée minimale τ, comprise (suivant les conditions de frontière et de fidélité) entre $1/2B$ et $1/B$.

Une seconde difficulté est, en télégraphie, le choix du *code* utilisé.

En effet, les messages à transmettre se présentent sous la forme d'une quarantaine de « symboles » ou « caractères » (lettres ou chiffres) ([4]) non représentables par un courant électrique, sinon par une convention arbitraire.

([1]) Terme forgé par Edouard ESTAUNIE, Ingénieur des Télégraphes et Membre de l'Académie Française ; adopté ensuite aux Conférences Internationales de Madrid (1932) et Atlantic-City (1947).

([2]) Voir MESNY, *Onde Electrique*, octobre 1935, « Théorie et Expérience en Radio-Electricité ».

([3]) Tenant compte d'une remarque faite par WRIGHT et MARR (*Telecommunications*, Febr. 1968, pp. 9-12) que le taux des erreurs ne peut être fixé avant d'en avoir collecté au moins 5 000, un taux de 10^{-12} ne pourrait être affirmé qu'après plusieurs années, voire plusieurs siècles d'expérience aux vitesses habituelles.

([4]) Du moins pour les langues indo-européennes, grâce aux Phéniciens, inventeurs de l'alphabet, et aux Arabes, inventeurs de la numération décimale. Les caractères idéographiques ne peuvent être transmis que comme « images fixes ».

Le plus simple est évidemment le codage « *binaire* » : présence ou absence du courant, ou, si l'on veut, d' « impulsions », c'est-à-dire d'éléments de courant aussi brefs que la voie pourra les transmettre, donc de durée τ définie ci-dessus : donc de « points », codés + ou 1, alternés avec des coupures, codées zéro. Un perfectionnement simple est le codage « *ternaire* » +1, 0, −1, si le sens ou la phase du courant peuvent être conservés ou retrouvés.

Il est intéressant d'observer que les inventeurs ont fait preuve, dès le début, d'une très grande ingéniosité pour structurer de tels codes, à tel point que les solutions actuelles n'en sont guère que le perfectionnement — sinon la copie. En voici la revue :

1. Pour la transmission des chiffres de 1 à 10, on peut jouer sur le *nombre* des éléments successifs transmis. C'est le système encore employé dans nos cadrans téléphoniques. Pour les 25 lettres de l'alphabet, il devient trop lent et trop sujet aux erreurs ([5]).

2. Un second paramètre possible est la *position* d'un seul élément τ *dans le temps*, par rapport à une horloge précise ou à un signal de synchronisation : télégraphe Hughes. Economie d'énergie, mais pas de gain en vitesse ou en sécurité.

3. Autre paramètre bien alléchant : l'*amplitude*. *Un seul* élément τ pouvant prendre à volonté 40 amplitudes distinctes, suffirait à désigner une lettre ou un chiffre.

On pourrait même aller beaucoup plus loin ([6]) ; malheureusement l'amplitude est le paramètre le plus sujet à détérioration en cours de transmission (fading, parasites, etc.) ; d'où une limite sur laquelle nous reviendrons.

4. Derniers paramètres utilisables : la *fréquence* ou la *phase* d'un courant « porteur », ou d'une modulation : faciles à produire et à détecter, et relativement peu vulnérables si le changement est suffisant (notamment pour une *inversion* de phase).

La manipulation sur la fréquence a été préconisée dès 1922 par ABRAHAM et PLANIOL ([7]) ; ses avantages étaient clairement soulignés par DE BELLESCIZE en 1935 ([8]).

Elle est toujours très « à la mode », mais elle ne résout pas, à elle seule, le problème du codage télégraphique, car il est impossible d'assigner une quarantaine de fréquences différentes aux caractères de l'alphabet.

5. Devant l'impossibilité de représenter tout l'alphabet par un seul paramètre — ou, si l'on veut, une seule « *dimension* » — la solution consiste évidemment à en combiner plusieurs.

S'il y en a n, dont chacun peut prendre k valeurs distinctes, le nombre des combinaisons possibles est de k^n ; cette croissance exponentielle est très avantageuse, même si $k = 2$ (code *binaire*, 0 et 1) ; il suffit de $n = 5$ pour réaliser $2^5 = 32$ combinaisons, c'est-à-dire (moyennant un artifice pour passer des chiffres aux lettres et inversement), tout l'alphabet.

Ainsi, dès 1837, le peintre Samuel MORSE imaginait son code (toujours en usage pour la « lecture au son »), combinant le paramètre « présence » (« zéro » ou « point ») avec le paramètre « durée » (trait = 3 points). Tenant adroitement compte de la fréquence des lettres pour affecter les combinaisons les plus courtes, il arrivait à ce que la durée moyenne d'un caractère ne dépasse pas 8 à 10 τ. En outre, avec ce système, certaines erreurs de transmission étaient détectées par les opérateurs, parce que la combinaison résultante était *étrangère au code*. (Nous retrouverons plus loin cet avantage de la « redondance », clé des codages modernes).

6. Une variante intéressante était suggérée en 1873 par Lord KELVIN pour accélérer la transmission sur les câbles transatlantiques, dont l'énorme capacité ralentissait trop le débit : au lieu de jouer sur la durée, on jouait sur le *signe* du courant (point = +, trait = −). Dans l'inscription au « siphon recorder », le risque de confusion entre signaux voisins était très diminué, et l'on pouvait augmenter la vitesse.

La méthode est applicable dans les systèmes à courant porteur avec une inversion de phase.

7. Si l'on accepte d'augmenter encore le nombre des « dimensions » du signal, il est avantageux d'aller jusqu'à 5, donnant 32 combinaisons. Tel est le code « BAUDOT » des télégraphistes français ([9]).

Tenant compte de l'adjonction de deux éléments supplémentaires « de départ » et « d'arrivée », la durée de chaque caractère est uniformément de 7 τ. Une adroite mécanique permet l'impression automatique des messages et le fonctionnement en multiplex.

Progrès des voies de communications

Depuis cette première décennie 1920-1930, les progrès ont d'abord porté sur les voies de communication elles-mêmes.

Les lignes bifilaires ont été remplacées par des *câbles à multiples paires*, avec pupinisation, puis répéteurs-amplificateurs, à intervalles réguliers.

Ensuite sont arrivés les *câbles coaxiaux* à courants porteurs, véhiculant plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de conversations distinctes.

Enfin l'arrivée des *guides d'ondes*, et notamment des types circulaires où l'onde H_0 s'affaiblit très peu, fait entrevoir la possibilité de transmettre, dans un

([5]) Il semble cependant encore employé par les « esprits frappeurs » dans les séances de spiritisme.

([6]) Dès 1930, TULLER (MIT, Report 114) montrait que le mot : NO, traduit en morse, puis en nombre binaire, pouvait être transmis par une seule impulsion d'amplitude égale à 477 147 unités. WOZENCRAFT, JACOBS (Principles of Communication Engineering, pp. 5-6) mentionnaient même la possibilité (théorique) de transmettre par une seule impulsion « toute la bibliothèque du Congrès ».

([7]) ABRAHAM, PLANIOL, *Onde Electrique*, juillet 1922, p. 381.

([8]) Voir article nécrologique sur M. DE BELLESCIZE, réf. 16, pp. 167-169.

([9]) Employé pour la première fois par voie radio-électrique en 1922 par ABRAHAM et PLANIOL entre Paris et Nogent-le-Rotrou.

seul guide, plusieurs centaines de milliers de voies téléphoniques, ou plusieurs milliers de voies de télévisions, jusqu'à des fréquences supérieures de l'ordre de la centaine de gigahertz.

L'amélioration des voies radio-électriques s'est avérée beaucoup plus riche en complications, mais aussi en surprises.

La surprenante réussite des essais transatlantiques de MARCONI (1901) avait montré que la propagation des ondes autour de la Terre était plus favorable que la simple diffraction autour d'une sphère semiconductrice ([10]). D'où l'hypothèse d'une couche ionisée dans la haute atmosphère (KENNELLY-HEAVISIDE) aboutissant à la formule (pudiquement qualifiée de « semi-empirique ») d'AUSTIN pour les « ondes longues »).

Vers 1922, coup de théâtre : les premiers expérimentateurs sur ondes « décamétriques » — notamment les jeunes amateurs — découvrent qu'un signal, inaudible dans une « zone de silence » rapprochée, peut être reçu avec une intensité incroyable à 5 000 ou 10 000 km — mais seulement en fonction de l'heure, de la saison, de la latitude... et de l'activité solaire. Il a fallu des années de recherches, la constitution de tout un réseau de « stations de sondage ionosphérique », l'exploitation des résultats par calculateurs, pour arriver à saisir le comportement des couches ionisées D, E, F, etc, et à établir des prévisions suffisamment sûres ([11]).

Toute la technique en est profondément influencée : aériens directifs, stabilité de la fréquence, lutte contre le bruit *interne* des récepteurs (devenu plus gênant que les parasites externes), rôle de la réaction (et de la super-réaction), intérêt du changement de fréquence, réception « diversité », etc.

Mais les très grandes portées, pour intéressantes qu'elles soient, n'enlèvent pas l'intérêt des portées de quelques dizaines de kilomètres. Alors interviennent la nature et le relief du sol, ainsi que la réfraction atmosphérique ([12]). Une étude complète de VAN DER POL et BREMMER pour les fréquences de 30 à 300 MHz aboutit en 1955 à la publication par l'UIT d'un « Atlas » de courbes en fonction de l'altitude des stations.

On découvre aussi qu'au-dessus des mers chaudes, une « super-réfraction » peut guider les ondes métriques et décimétriques comme dans un « conduit » — conférant ainsi aux radars des portées parfois stupéfiantes.

Entre ces portées — relativement faibles — et celles, lointaines, obtenues en ondes décamétriques, subsistait toutefois un intervalle défavorisé de portées « moyennes » (disons de 100 à 700 km). Cette lacune est comblée par la découverte (vers 1950) de la « tropo-diffusion avant » dans les couches élevées de la troposphère. Avec des faisceaux puissants d'ondes ultra-courtes, on peut ainsi obtenir un record de sécurité, de l'ordre de 99 % du temps ([13]).

Les progrès des codes anti-erreurs

Tous ces progrès sur les voies de transmission, « sur fil » et « sans fil », ont évidemment amélioré beaucoup la sécurité des liaisons, de sorte qu'une bonne partie du trafic peut se faire en utilisant les codes très simples, précédemment décrits.

Il est cependant rare que, sous l'effet des variations d'intensité, des parasites, des coupures, etc., le taux d'erreurs puisse être garanti inférieur à l'ordre de 1 %. Or, certains types de télécommunications (télex, mesures, chiffre, données numériques, etc.) exigent beaucoup mieux.

Il faut alors avoir recours à des « *codes anti-erreurs* » spéciaux, c'est-à-dire dans lesquels on ajoute au message des « éléments de vérification » supplémentaires ([14]) — au prix, naturellement, d'une diminution de la vitesse « commerciale » de transmission de l'information proprement dite.

Le problème est évidemment d'obtenir la meilleure protection possible avec le plus petit nombre d'éléments supplémentaires — et des opérations de codage et de décodage simples et rapides.

Des trésors d'ingéniosité y ont été dépensés.

La « répétition »

La solution la plus simple est évidemment de répéter le message et de comparer ses « éditions » successives.

Il est clair que si le même élément est transmis n fois, avec la probabilité d'erreur p à chaque fois, la probabilité qu'il soit brouillé les n fois est p^n, qui décroît très vite quand n croît, à la condition essentielle que p soit déjà petit.

Si $n = 2$, et si les deux versions successives du même élément sont différentes, l'erreur est *détectée* (à condition d'être unique) mais non corrigée (à moins que l'une des deux soit plus probable, soit d'après le contexte, soit d'après la statistique générale ?).

Si $n = 3$, et deux versions identiques, on peut les adopter en vertu du principe « majoritaire ».

([10]) Voir notamment BOUDOURIS, *Onde Electrique*, mai 1957, pp. 465-470.

([11]) Voir de nombreux articles dans *L'Onde Electrique* : MESNY, juill. 23, p. 391 ; janv. 24, p. 25 ; févr., p. 99 ; sept. 26, p. 434 ; avr. 28, p. 129 ; mai 29, p. 103. BUREAU, août 24, p. 385 ; juil. 26, p. 301 ; mars 30, p. 93 ; avr. 30, p. 166 ; avr. 35, p. 193. VILLEM, 1932, p. 427. LEJAY, avr. 48, p. 129 ; juill. 48, p. 268. C.R. de Colloque sur la Propagation, mai 57. C.R. successifs de l'URSI ; diagrammes de champs mesurés à Meudon, 1923-26, etc.

([12]) Signalée notamment par JOUAUST, *Onde Electrique*, 1930, pp. 5-17.

([13]) Voir dans ce numéro l'article « Faisceaux hertziens transhorizon ».

([14]) Nous appelons ici « *élément* » le signal de durée minimale τ, quelles que soient sa forme et son amplitude. On l'appelle aussi parfois « point », « digit », « moment » et même « *bit* », créant ainsi une fâcheuse confusion avec le « bit » de SHANNON, unité d'information (choix entre deux éventualités également probables, pile ou face). Un « élément » de signal transporte rarement un « bit » ; s'il est binaire, il transporte souvent *moins* d'un bit, parce que les deux éventualités ne sont pas également probables ; s'il peu prendre *plusieurs* dimensions, il transporte *plus* d'un bit.

Pour rustique qu'apparaisse la méthode, elle a été la seule employée aux premiers âges de la TSF ; la répétition étant faite mot par mot, ou parfois, dans les messages « en clair », pour les noms propres seulement.

Certains télégraphes automatiques s'y sont adaptés, par exemple le Baudot, avec « mise en mémoire » de chaque caractère dans un relais mécanique ([15]).

Les codes à grande redondance

Une autre solution consiste à identifier chaque caractère par un nombre d'éléments supérieur au minimum nécessaire (donc 5 avec le code binaire habituel) de manière à réaliser un nombre supérieur de combinaisons, parmi lesquelles une fraction seulement est reconnaissable comme « mots de code », les autres ne pouvant résulter que d'une ou plusieurs erreurs de transmission.

Le plus ancien système de ce type est le SIEMENS-HELL ([16]), dans lequel chaque caractère est identifié par sa forme graphique (un peu simplifiée), qui est « explorée » en plusieurs bandes successives : 5 verticales, plus deux de séparation, et 12 horizontales, dont deux de marge ; au total donc, décomposée en $7 \times 12 = 84$ éléments. Sur ce total, quelques erreurs, en plus ou en moins, n'empêchent pas la reconnaissance du caractère, grâce au « pouvoir discriminateur » de l'œil et à l'intelligence du destinataire.

Par exemple, sur la figure 1, on lira *I* malgré 5 erreurs et *B* malgré 6 erreurs.

Les récents progrès ont consisté à généraliser ce principe au cas où la reconnaissance du caractère ne se fait plus « optiquement », mais par une corrélation précise (par exemple avec un calculateur), ce qui permet de mesurer et d'accroître la protection obtenue.

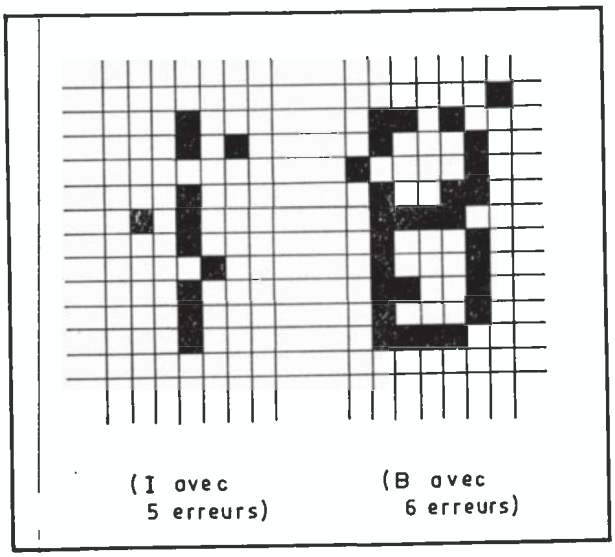


FIG. 1. — Système antiparasite Siemens-Hell.

Si, au « message » proprement dit, comprenant par exemple m éléments binaires (c'est-à-dire formant une certaine combinaison parmi les $M = 2^m$ possibles), on ajoute un certain nombre n d'éléments binaires de vérification, on porte ainsi le nombre total des éléments à $(m+n)$ et par suite, le nombre des combinaisons possibles à $N = 2^{(m+n)}$ (qui croît très rapidement avec m et n). Il s'agit de choisir, parmi elles, les M utilisées pour constituer les messages, *aussi différentes que possible*. Si l'on arrive à ce que deux quelconques d'entre elles aient toujours d éléments différents (au moins), (« distance de HAMMING ») on est sûr que des erreurs quelconques, en nombre inférieur à d, seront toujours décelées, puisqu'elles transformeront la combinaison du message en une autre qui ne sera plus acceptable. De plus, si le nombre des erreurs est inférieur à $d/2$, elles pourront être « corrigées », parce que la combinaison erronée « ressemblera » à l'une des combinaisons correctes, plus qu'à aucune autre : il sera donc logique de l'y assimiler.

Le problème est donc de trouver des règles et des dispositifs relativement simples pour fabriquer et reconnaître les combinaisons correctes et, parmi les autres, celles qui leur « ressemblent » le plus.

Dans les codes « de parité », on ajoute aux éléments de message des « éléments de parité » obtenus en faisant la somme de deux ou plusieurs éléments (binaires), soit consécutifs, soit pris dans le message à des rangs convenus, en oblique, en zigzag, etc. ([17]).

Dans les codes « cycliques » et « de convolution », le message est découpé en tranches, dont chacune est répétée plusieurs fois après avoir subi une certaine transformation ; par exemple avec trois éléments x_1, x_2, x_3, on transmettra successivement :

$$x_1, x_2, x_3, (x_1+x_2), (x_2+x_3), (x_1+x_3), (x_1+x_2+x_3)$$

suite ne comprenant que sept éléments, mais où, pourtant, chacun figure quatre fois, ce qui permet de localiser une erreur.

La protection augmente avec le nombre des éléments de vérification ajoutés, mais pas indéfiniment, parce que, en même temps que leur nombre, augmente la probabilité que certains soient erronés.

De plus, l'augmentation exponentielle du nombre N de combinaisons possibles déborde rapidement la capacité de mémoire des calculateurs, et le temps mis pour rechercher celle qui « ressemble » le plus à une combinaison erronée, devient excessif ([18]). Il faut donc établir pour le calculateur de décodage un pro-

([15]) Brevet VERDAN 595.335, 4 juin 1924.

([16]) GUYOT, *Onde Electrique*, avril 1935, pp. 203-213. Voir aussi une variante LMT. DEVAUX, *Onde Electrique*, mai 1938, pp. 217-246.

([17]) On arrive, par exemple, à corriger jusqu'à 15 erreurs, en ajoutant à $m = 7$ éléments d'information, $n = 56$ éléments de contrôle (total 63) (cité par GOUDET, GIRINSKY, *Onde Electrique*, mai 1965, pp. 589-602).

([18]) Pour décoder des messages envoyés par les engins spatiaux, on accepte des durées de plusieurs jours, voire de plusieurs semaines. Mais aux vitesses « normales », WOZENCRAFT et JACOBS (*loc. cit.*, p. 387) ont montré qu'on arriverait à exiger des calculateurs une vitesse de 10^{-22} ns par opération élémentaire.

gramme extrêmement perfectionné (« sequential decoding ») pour suivre le déroulement d'une combinaison, la comparer à chaque élément à un « arbre de décodage » connu, et dès qu'il y a un écart, revenir en arrière et rechercher, par tâtonnement l'écart minimal. Des volumes entiers ont été écrits sur ce problème.

Rôle de la théorie de l'information

Tous ces progrès ont été d'abord inspirés par le désir d'améliorer les télécommunications. Mais ils ont été aussi fortement stimulés par la « Théorie de l'Information » de SHANNON (1948).

Les lecteurs de l'*Onde Electrique* sont certainement familiers avec cette théorie, mais peut-être seront-ils intéressés par quelques commentaires sur les espoirs qu'elle a fait naître et les déceptions qui ont suivi.

Considérant une « voie » dont la largeur de bande est W (Hz) qui reçoit un signal de puissance P en présence d'un bruit « *blanc gaussien* » de puissance N, SHANNON montre que :

1) la *capacité* de cette voie (nombre de bits d'information qu'elle peut transmettre par seconde) est :

$$C = W \cdot \log_2 (1 + P/N) \qquad (1)$$

(et non pas W, comme on l'avait cru) ;

2) à l'intérieur de cette limite, c'est-à-dire tant que le nombre R de bits/s est inférieur à C, il n'y a pas de *limite inférieure* à la probabilité d'erreur.

(Si les Radio-Electriciens ne s'en étaient jamais aperçus, c'est par manque d'imagination).

A la vérité, ces deux affirmations se présentaient comme purement théoriques (un peu comme l'existence d'un « zéro absolu » de température), et rien ne permet de dire comment, ni jusqu'à quel point, on peut s'en rapprocher.

Pour les interpréter, considérons une liaison dans laquelle on veut transmettre R bits/s, en disposant, à la réception, d'une énergie E_b par bit, en présence d'un bruit blanc gaussien de « densité d'énergie » N_0.

Il peut arriver — c'était le cas des premières télécommunications — que le rapport signal/bruit, P/N_0, soit faible, c'est-à-dire juste suffisant pour que l'on puisse distinguer la présence ou l'absence du signal. Dans ce cas, les « éléments » transmis sont binaires, chacun contient (au plus) *un* bit d'information, et comme leur durée minimale est $\tau = 1/W$, le nombre R, et donc la capacité de la voie, est au maximum de W — comme l'indique la formule (1) lorsque $P = N_0$.

Dans ces conditions, le taux d'erreurs est assez élevé, parce que si le niveau P du signal est (supposé) constant, le niveau *instantané* du bruit aléatoire varie, et crée de « faux signaux ». Il est possible de calculer la probabilité d'erreur correspondante, soit pour un élément, soit pour un « bloc » (« mot ») de 10 ou 20 éléments, et de voir comment elle diminue lorsque le rapport signal/bruit E_b/N_0 augmente. On trouve ainsi les courbes 2, 3, 4 figure 2, montrant que cette diminution est *lente* ; un taux d'erreur de l'ordre de 0,01 ne peut être atteint que pour un rapport E_b/N_0

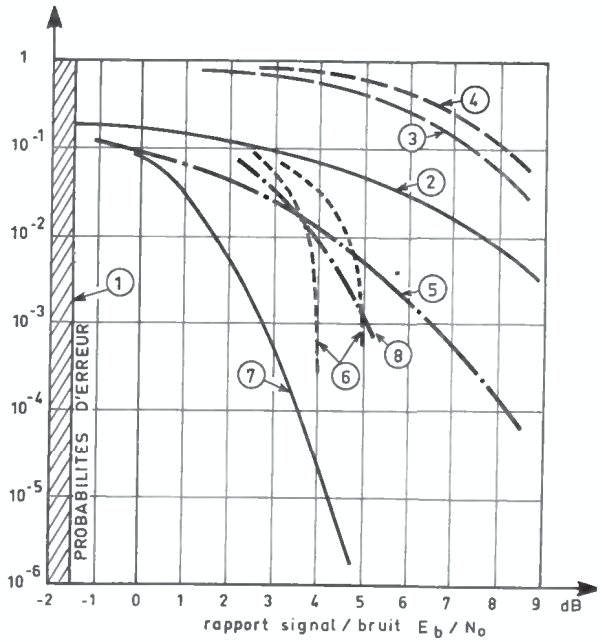


FIG. 2. — Probabilités d'erreur en fonction du rapport signal/bruit

1. Limite théorique (Shannon)
2. Elément binaire isolé
3. Bloc de 10 éléments binaires
4. Bloc de 20 éléments binaires
5. Modulation de phase (PSK)

(2, 3, 4, 5 : non codés) (calculé)

6. Codex « Sequential decoding »
7. Codex VITERBI

(6, 7 : Forney, *Spectrum* June 70 Figure 15)

8. Engin Spatial Mariner, 1969 (« Mots de 6 bits »), Mesuré (NASA Report 33-1954).

de 8 à 10 dB. C'est bien la difficulté rencontrée dans les premières radiocommunications, en dépit des efforts pour augmenter la puissance des émetteurs.

Mais si, grâce aux progrès techniques, on peut donner à chaque élément de signal, non plus 2 « dimensions » (0 et 1), mais n dimensions distinctes (amplitudes, fréquences, phases, ou une combinaison quelconque de ces paramètres), et si l'on continue à en transmettre W par seconde, la quantité d'information transmise croît comme $\log_2 \cdot W^{n/2}$ c'est-à-dire comme $n/2$. Mais il faut tenir compte que l'énergie est maintenant répartie entre $W \cdot n$ « dimensions » au lieu de $2 \cdot W$, c'est-à-dire que le rapport E_b/N_0 décroît comme $2/n$. La formule (1) devient donc :

$$C' = \frac{n}{2} W \log_2 \left(1 + \frac{2E_b}{nN_0}\right) = W \left[\frac{n}{2} \log_2 \left(1 + \frac{2E_b}{nN_0}\right)\right] \qquad (2)$$

et si n croît indéfiniment, la « capacité limite par unité de largeur de bande » devient :

$$C_\infty = \frac{E_b}{N_0} \log_2 e = 1{,}44 \frac{E_b}{N_0} . \qquad (3)$$

La variation du rapport C'/C, c'est-à-dire, l'augmentation (théorique) de la capacité de la voie avec le nombre n de dimensions, est donnée par la figure 3 pour différents rapports signal/bruit E_b/N_0.

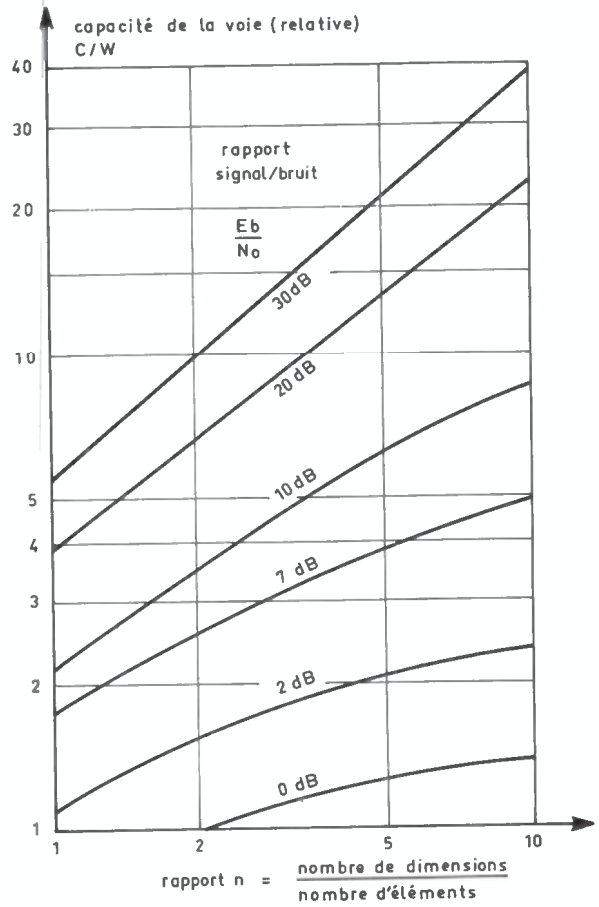


FIG. 3. — Capacité relative de la voie en fonction du nombre de « dimensions » par élément.

On voit qu'elle est intéressante *si* (et seulement si) ce rapport est élevé ; ce qui est bien compréhensible : lorsque le signal est à peine supérieur au bruit, il est illusoire de vouloir y distinguer *sûrement* plusieurs « dimensions ».

Si l'on précise la structure du code, c'est-à-dire la nature des « dimensions » du signal, il est possible de calculer la probabilité d'erreur ; elle augmente nécessairement avec ce nombre n (puisque l' « énergie par dimension » décroît) et tend vers l'unité quand on approche de la capacité limite (3).

Par exemple, WOZENCRAFT et JACOBS ([19]) ont calculé cette probabilité pour un type de transmission particulièrement avantageux : la modulation *en position* d'une impulsion (PPM).

On peut en déduire les courbes figure 4 dans lesquelles l'abscisse représente le rapport R/c_∞ de la vitesse effective de transmission R, à la « capacité limite par unité de largeur de bande », c_∞ (formule (3) ci-dessus) et pour des « blocs » de durée T, c'est-à-dire comprenant $RT = 10, 20, 50$ éléments.

On voit que la probabilité d'erreur ne descend à des valeurs vraiment faibles, que si le rapport

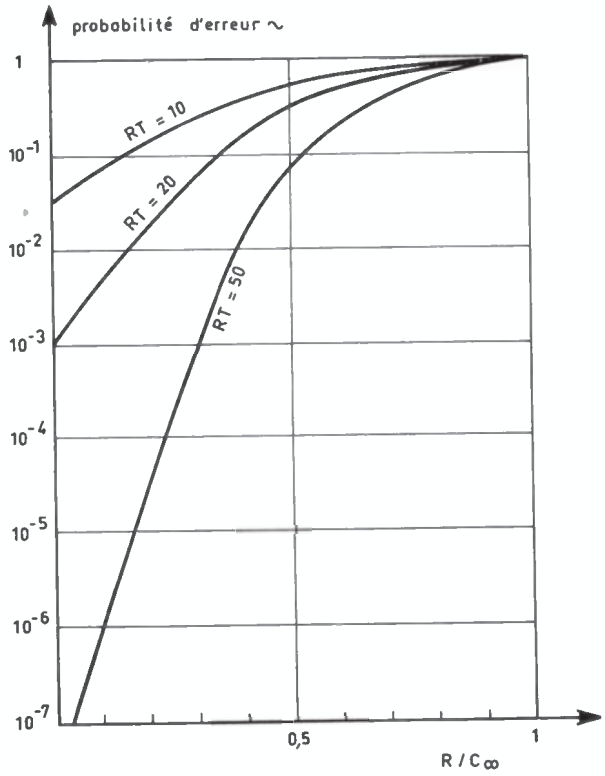


FIG. 4. — Augmentation de la probabilité d'erreur lorsque la vitesse de transmission R se rapproche de la capacité limite c_∞.

R/c_∞ de la vitesse effective à la capacité théorique maximale, reste faible, et à la condition d'opérer sur de longs blocs, difficiles à coder et à décoder.

C'est ce que l'expérience avait depuis longtemps montré.

On comprend ainsi que les admirables efforts d'imagination des constructeurs de code n'aient pas donné tous les résultats qu'une théorie simplifiée faisait espérer. L'un d'eux ([20]) constate avec mélancolie que : « les *meilleurs* codes calculés sont inférieurs à la *moyenne* de ceux prévus par la théorie, parce qu'il a fallu se borner à des structures trop simples ». Les résultats *pratiques* sont décevants ([21]) : « Dans les innombrables *Conventions* où des sessions étaient réservées à ce problème, les « practical men » concluaient que « information would do nothing for them » et que « all codes were good, except those we can think of ».

Il n'y a donc pas lieu d'abandonner entièrement la tactique des premiers radio-électriciens, qui cherchaient surtout à augmenter la puissance. Atteindre la capacité limite théorique en élaborant des codes de plus en plus complexes, semble aussi difficile que d'atteindre le « zéro absolu » en « concoctant » des mélanges réfrigérants.

Il est d'ailleurs facile de préciser certaines des causes de cet insuccès.

Tout le calcul de la probabilité des erreurs est basé

([19]) *Loc. cit.*, chap. 5. Notre figure 4 est déduite de la formule (5.106*a*) et de la courbe figure 5.28, formule (5.95*b*).

([20]) WOZENCRAFT JACOBS, *loc. cit.*, pp. 385-386.

([21]) FORNEY, *Spectrum*, June 1970, p. 47.

sur le rapport signal/bruit E_b/N_0, avec les hypothèses que le *niveau du signal est constant* et le *bruit « blanc gaussien »*.

Or, il est bien évident que ces simplifications sont souvent très éloignées de la réalité.

Sur les lignes et câbles, le niveau du signal varie avec la température, l'hygrométrie, le gain des répéteurs, etc. Sur les voies radio-électriques, il varie encore bien davantage avec les irrégularités de propagation : réfraction atmosphérique, réflexion ionosphérique, trajets multiples, évanouissements... et, si l'un des postes se déplace, avec les irrégularités du sol, les obstacles voisins, etc.

La correction de ces effets ne peut jamais être totale.

Quant au bruit, seul le bruit *thermique* est blanc gaussien.

Le bruit atmosphérique est bien loin de l'être, et personne ne s'est jamais fait d'illusions là-dessus. La figure 5 reproduit les courbes statistiques du CCIR (Los Angeles, 1959, rapport 99), manifestant, entre le bruit thermique (courbes *A*, *C*) et le bruit atmosphérique (courbes *B*, *D*), pour la distribution dans le temps, un écart de deux puissances de 10. Un disciple de SHANNON ([22]) reconnaît que : « the probability of a typically large noise may be orders of magnitude larger than that produced by the Gaussian model ».

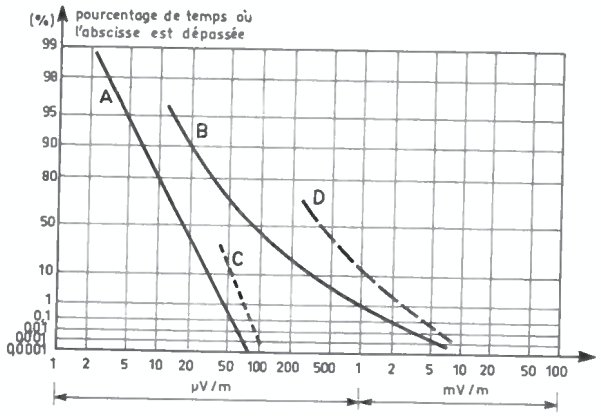


FIG. 5. — Comparaison des bruits thermiques et atmosphériques (CCIR 1959, rapport 99).
A. Enveloppe du bruit thermique.
B. Enveloppe du bruit atmosphérique.
C. Erreurs dues au bruit thermique.
D. Erreurs dues aux bruits atmosphériques.

Il s'y ajoute un contingent de parasites artificiels dus à tous les équipements électriques fonctionnant aux environs ([23]) et sur les câbles et les lignes, les inductions parasites, la diaphonie, les coupures intempestives... dont le niveau est même parfois accru à contre-temps lorsque le signal baisse, par suite de la régulation automatique du gain des répéteurs ([24]).

Il existe cependant un cas privilégié : celui de la réception des signaux des engins spatiaux : puissantes antennes braquées vers le ciel, et placées dans des sites sélectionnés : les bruits atmosphériques et artificiels sont presque inexistants, et les précautions contre le bruit thermique sont poussées à l'extrême.

La transmission des sons

La transmission des sons a fait, elle aussi, l'objet de beaucoup de recherches et de progrès, dans des sens variés, parfois même opposés.

Tantôt on a visé la perfection, avec la « haute fidélité », la stéréophonie, la modulation de fréquence.

Tantôt, au contraire, on a visé l'économie, en profitant de l'extraordinaire tolérance que présentent l'oreille et le cerveau humains :

— sur la bande passante transmise, fréquemment normalisée à 300-3 000 Hz, mais souvent inférieure, et la bande latérale unique ;

— sur la variation d'amplitude, avec une « compression » systématique, allant parfois jusqu'à la « parole à niveau constant » ([25]) ;

— sur la linéarité, en acceptant une distorsion importante de cette amplitude.

Mais le fait le plus important est sans doute la tendance à « numériser » la modulation téléphonique, avec le double intérêt :

— que, dans une suite de retransmissions par répéteurs, faisceaux hertziens, etc., chaque élément « numérique » est « régénéré » à chaque répétition, et par suite le bruit — s'il est assez faible dans chaque section — ne se cumule pas ;

— la transmission « *multiplex* » devient facile en intercalant sur la voie les impulsions de plusieurs conversations.

Les derniers perfectionnements consistent à coder, non plus l'amplitude de chaque échantillon, mais sa variation par rapport à la précédente, c'est-à-dire la pente de la courbe (modulation en delta) ([26]), qui peut même être asservie à la vitesse de variation d'un échantillon à l'autre. Ce système semble détenir le record d'insensibilité au bruit : il accepte sans dommage une probabilité d'erreur de 0,1 sur chaque élément ([27]).

Tout cela est plus expérimental que théorique.

Le radar

Le radar procède évidemment d'une technique tout à fait spéciale ; son développement depuis les années 1930 justifie plusieurs articles qui paraîtront dans le numéro de septembre 1971 de *L'Onde Electrique*.

([22]) WOZENCRAFT, JACOBS, *loc. cit.*, p. 404.

([23]) FORNEY, *loc. cit.*, mentionne notamment les distributeurs de Coca-Cola.

([24]) R.T. JAMES, *Spectrum*, janvier 1965, p. 79, *Data Transmission*.

([25]) DAGUET, GILABERT, *Onde Electrique*, mai 1961, pp. 498-509.

([26]) LIBOIS, *Onde Electrique*, août-septembre 1954, pp. 675-682.

([27]) BERGERON, *Telecommunications*, décembre 1969, p. 32. (Généralités sur le bruit en téléphonie, DE JAGER, *Onde Electrique*, août-septembre 1954, pp. 675-682).

Nous voudrions seulement, pour terminer, en mentionner ici quelques aspects qui relèvent, en vérité, de la théorie générale des télécommunications et qui ont déjà contribué, et peuvent contribuer encore, à ses progrès.

1° On peut noter d'abord que la théorie des « guides d'ondes » et la réalisation de tout l'appareillage associé (coupleurs directionnels, bifurcations, T-magiques, duplexeurs, circulateurs, etc.), ainsi que les premiers détecteurs à cristal, les tubes T-R et anti-T-R, ont été développés en vue du radar et de ses applications militaires pendant la période 1935-1945, pour être ensuite utilisés de façon beaucoup plus générale.

2° Beaucoup de progrès des antennes dirigées ont été, de même, stimulés et mis en pratique pour le radar.

Ainsi, les formes les plus favorables de miroirs réflecteurs, c'est-à-dire, celles donnant le lobe principal le plus fin (voire de doubles lobes ou de multi-pinceaux) et les lobes parasites les plus réduits, ont pu être re-calculées avec des ordinateurs puissants et des programmes complexes.

Et surtout, on a pu réaliser des antennes en rideaux plans fixes, comportant un très grand nombre de sources (dipôles) élémentaires — jusqu'à 10^5, paraît-il — dans lesquelles l'intensité et la phase sont réglées par des semiconducteurs ou des ferrites, commandés par calculateurs ; de telle sorte que, sans aucun déplacement physique du « projecteur », le faisceau peut être orienté à volonté, avec une agilité incroyable, au point de pouvoir suivre plusieurs objectifs distincts avec une quasi-simultanéité.

3° Une augmentation notable de l'énergie émise a pu être obtenue, non seulement par l'emploi de tubes (notamment de klystrons multi-cavités, de puissance atteignant 20 MW), mais aussi grâce à la technique nouvelle de « compression d'impulsions » : la durée du signal de départ est augmentée, mais en même temps sa fréquence est modulée, de telle sorte que l'écho en retour peut être raccourci, « comprimé dans le temps », par passage dans une ligne à retard dispersive (où la vitesse est fonction de la fréquence). On conserve ainsi toute la finesse d'analyse de la distance et même du « profil » des cibles détectées.

4° Tous les procédés possibles pour la détection des signaux faibles dans le bruit : filtrage adapté, corrélation entre signaux successifs, etc., ont été poussés au maximum. Et même, lorsque la distance radar-cible varie régulièrement (cas des cibles extra-terrestres, engins spatiaux, planètes, etc.), on a pu corréler efficacement des centaines et même des milliers d'échos successifs.

5° L'utilisation de l'« effet Doppler » a été poussée, elle aussi, avec une ingéniosité exceptionnelle, pour obtenir toutes sortes de résultats : élimination des échos parasites produits par les obstacles fixes, et par suite détection des avions, même à très basse altitude ; détermination de la vitesse radiale des cibles mobiles et sélection de celles-ci ; comparaison des impulsions successives en cohérence de phase ; possibilité de réduire au minimum les « vitesses aveugles » et les ambiguïtés de vitesse et de distance ; radars de navigation donnant la vitesse vraie par rapport au sol.

6° La « mise en mémoire » optique de tous les échos recueillis dans le balayage d'une zone étendue à partir d'un radar aéro-porté et leur comparaison avec les mêmes, un instant T plus tard, donne la même discrimination angulaire que si la largeur de l'antenne était égale au parcours de l'avion porteur pendant ce temps T (« side-looking » ou « synthetic-aperture » radar).

Parmi les nombreux témoignages de tous ces progrès, la figure 6 en présente un, particulièrement suggestif : il s'agit du « gain en sensibilité » des radars destinés à la détection des objets extra-terrestres, et notamment des planètes : de 1944 à 1969, le gain a été, très régulièrement, de 5,5 dB par an ([28]).

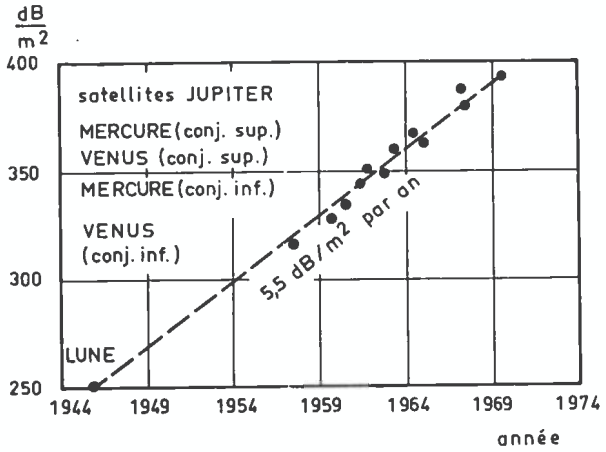


FIG. 6. — Augmentation progressive de la sensibilité des radars. (GORDON, URSI, DELLINGER Memorial Lecture, 1966, pp. 18-19). *Nota :* La signification des ordonnées n'est pas précisée. Il semble s'agir de l'affaiblissement (en dB) entre une antenne d'émission et une de réception, supposées de 1 m².

L'extrapolation de cette loi est profondément encourageante !

Conclusion

Au début de cet article, nous avions cru nécessaire de souligner que les progrès en électronique résultaient toujours (quoique en proportions variables) d'une combinaison entre l'imagination des chercheurs, la patience des expérimentateurs et l'effort des théoriciens.

Au cours de cet article, nous en avons donné plusieurs exemples. En voici un dernier, encore emprunté au domaine, particulièrement difficile, des télécommunications spatiales ([29]).

([28]) GORDON, Comptes Rendus de l'URSI, Dellinger Memorial lecture, 1966, pp. 18-19.

([29]) J.P.L. Technical Report 32-1354. A High-Rate Telemetry system for the Mariner Mars 1969 Mission.
BLANC-LAPIERRE, *R.G.E.*, septembre 1970, pp. 623-629.

En 1965, l'engin spatial MARINER IV avait retransmis des images photographiées de la planète Mars à la cadence de 8 1/3 bauds. Pour chaque image, la durée était de 8 h 30 mn. C'était excessif.

Pour ses successeurs, MARINER VI et VII, on s'est donc proposé de porter la vitesse à 16 200 bauds — soit 5 mn par image — ce qui exigeait un gain supplémentaire de 32,90 dB dans la transmission.

Pour les trouver, on a eu recours à tous les artifices possibles :

Une modification du système de transmission a permis de supprimer le « canal de synchronisation », économisant ainsi 3,50 dB.

A l'émission, on a pu gagner 3,10 dB sur la puissance, 0,10 dB sur l'antenne et 3,96 dB sur l'« index de modulation ».

A la réception, l'antenne a été agrandie, d'où gain 8,50 dB ; le gain du récepteur a été augmenté de 2,96 dB tout en améliorant le facteur de bruit de 4,10 dB. Un codage nouveau bi-orthogonal a fourni 2,20 dB.

Le total de ces gains montait donc à 7,16 dB à l'émission, 17,76 dB à la réception, plus les 3,50 dB d'économie sur la synchronisation, total 28,42 dB.

Il s'en fallait encore un peu, mais la différence a été fournie gratuitement par les astronomes, car, d'après eux, la distance en 1969 passerait par un minimum de $97 \cdot 10^6$ km au lieu de $216 \cdot 10^6$: cadeau de 6,84 dB. D'où une marge de 2,36 dB, qui s'est avérée parfaitement suffisante.

L. BOITHIAS F. du CASTEL J. VOGE

Ingénieur en Chef des Télécommunications

Ingénieur en Chef des Télécommunications

Ingénieur Général des Télécommunications
Président du CNFRS

Propagation des ondes radioélectriques

PRÉSENTATION

Si l'on considère l'évolution des études de propagation des ondes radioélectriques depuis la découverte de la radioélectricité — à la fin du siècle dernier — on est frappé par la grande importance qu'y ont toujours attachée les techniciens et les scientifiques. Quatre des huit commissions de l'Union Radio-Scientifique Internationale y sont consacrées, ainsi que deux (trois jusqu'en 1959) commissions du Comité Consultatif International des Radiocommunications.

On peut cependant noter, lorsque l'on considère les étapes de cette évolution dans les recherches sur la propagation, trois stades différents, souvent imbriqués d'ailleurs, et que l'on retrouve avec un certain décalage suivant les gammes de longueur d'onde.

Le premier stade est celui qui a permis de découvrir de nouveaux procédés de radiocommunications. C'est ainsi que l'observation de signaux réfléchis sur l'ionosphère a rendu possible les transmissions à très grande distance, sur ondes longues puis sur ondes décamétriques. La stabilité — d'ailleurs relative — qu'on a pu observer sur les vitesses et les directions de propagation des ondes, a conduit à la mise en œuvre de nombreux dispositifs ou procédés de radiodétection, radionavigation ou radioguidage. Les découvertes plus récentes de la propagation anormale (superréfraction) et des propagations par diffusion troposphérique et ionosphérique des ondes métriques et plus courtes ont rendu possibles les observations de radar bien au-delà des limites de la visibilité optique — dans certaines conditions météorologiques — et les liaisons de faisceaux hertziens transhorizon que l'on a vu se développer depuis 1955 dans de nombreuses régions du monde.

Le second stade — qui se poursuivra encore longtemps, malgré une accumulation de résultats et d'interprétations théoriques sur la plupart des gammes de fréquences — vise à déterminer les caractéristiques optimales et les meilleures conditions d'exploitation des équipements radioélectriques, ainsi que la sécurité et les limites de précision à en attendre. On peut citer, par exemple, les études qui portent sur les perturbations de l'ionosphère et leurs répercussions sur les communications, sur les prévisions de fréquences à utiliser sur une liaison ionosphérique, sur les fluctuations ou les variations dans les temps de propagation et les directions d'arrivée qui altèrent les précisions de localisation, sur les évanouissements de signaux ou les divers types de bruits et de parasites. L'article de L. BOITHIAS, consacré essentiellement à l'influence sur la propagation des régions non ionisées de l'atmosphère — c'est-à-dire, en fait, de la basse atmosphère terrestre, au-dessous d'une dizaine de kilomètres d'altitude — traitera tout particulièrement des problèmes liés aux faisceaux hertziens opérant en ondes métriques, décimétriques et centimétriques.

Le troisième stade dans les études de propagation consiste à utiliser les ondes radioélectriques pour sonder le milieu traversé et déterminer ainsi ses caractéristiques, sa composition, ses propriétés physiques et chimiques. Ces procédés de sondage à distance — connus depuis longtemps pour l'étude de la structure de l'ionosphère — ont fait l'objet de très nombreux développements au cours de ces toutes dernières années. Les domaines d'investigation portent sur la basse atmosphère, sur l'ionosphère, sur la magnétosphère qui s'étend au-delà de l'atmosphère terrestre, sur le milieu interplanétaire, et aussi sur les surfaces et les atmosphères des autres planètes. Mais c'est surtout dans l'ionosphère et la magnétosphère que ces méthodes se sont révélées jusqu'ici les plus fructueuses : l'article de F. du CASTEL résume les principaux résultats qui ont ainsi été obtenus.

Les deux chapitres qui suivent ne pourront malheureusement donner qu'un aperçu beaucoup trop succinct du domaine très vaste de la propagation radioélectrique, qu'il faut d'ailleurs étendre, depuis l'apparition du laser, jusqu'au spectre optique et infrarouge. Nous pensons toutefois que les sujets traités sont parmi ceux qui soulèvent actuellement le plus grand intérêt et les discussions les plus passionnées entre chercheurs et auxquels les organismes de recherches spécialisés consacrent les moyens les plus puissants.

* Ce chapitre a été écrit par M. J. VOGE.

LES RÉGIONS NON IONISÉES DE L'ATMOSPHÈRE*

1. Introduction

Il serait bien prétentieux et d'ailleurs totalement vain de vouloir, en quelques pages, présenter l'état actuel des connaissances dans le domaine de la propagation des ondes. Il a paru préférable, pour ce numéro spécial de *l'Onde Electrique*, d'adopter un point de vue plus général et de négliger les détails pour voir seulement quelques aspects fondamentaux de la propagation dans la troposphère. Après un bref survol historique, tout indiqué pour un numéro de cinquantenaire, on passe rapidement en revue les résultats les plus importants obtenus depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, en montrant, d'ailleurs, qu'une grande partie de ces résultats a été obtenue en France.

En adoptant un tel point de vue on pourrait s'attendre à trouver à la fin de cet article un grand nombre de références bibliographiques, mais comme, dans ce cas, le nombre des références oubliées ou omises serait encore plus élevé que celui des références présentées, on a jugé préférable de n'en mettre aucune.

2. Caractères particuliers des études concernant la propagation des ondes

La propagation des ondes est entièrement décrite par les équations de Maxwell qui sont connues depuis plus d'un siècle. On pourrait donc croire qu'il suffit d'appliquer ces équations à chaque problème particulier, en tenant compte des caractéristiques du milieu et des conditions aux limites sur les divers obstacles. Cela est en effet parfaitement exact d'un point de vue théorique mais absolument impossible en pratique. L'application des équations de Maxwell à quelques cas extrêmement simplifiés et idéalisés comme celui de la propagation autour de la terre supposée parfaitement sphérique, douée de caractéristiques électriques uniformes, et entourée d'une atmosphère homogène, conduit déjà à de telles complications mathématiques qu'il est évidemment hors de question d'envisager un modèle plus proche de la réalité.

On a donc été conduit à remplacer cette méthode synthétique par une méthode plus analytique consistant à étudier séparément tous les phénomènes physiques qui influencent la propagation des ondes (réfraction, réflexion, diffraction, etc.) et à combiner leurs effets.

D'autre part, l'onde électromagnétique possède, en plus de ses caractéristiques purement électriques, une caractéristique spatiale qui est la longueur d'onde, et il est à prévoir que cette longueur va intervenir directement par sa comparaison avec les diverses autres dimensions géométriques des obstacles ou des discontinuités du milieu de propagation ; or, les longueurs d'onde ont un domaine de variations extraordinairement étendu puisque, même en se limitant au domaine des ondes hertziennes, le rapport extrême dépasse 10^7. Il est bien évident que les phénomènes physiques prépondérants ne vont pas rester les mêmes tout au long d'une échelle aussi démesurée. Par exemple, une onde kilométrique pourra franchir aisément une colline, alors que cette même colline constitue un obstacle pratiquement infranchissable pour un faisceau d'ondes centimétriques. Par contre, un obstacle de faibles dimensions pourra réfléchir parfaitement une onde suffisamment courte alors que, pour une onde plus longue, la réflexion sera inexistante.

Cette variation extrême de l'échelle des longueurs d'ondes simplifie, dans une certaine mesure, la méthode analytique mentionnée plus haut, car elle permet, suivant la gamme de fréquence considérée, de négliger tel ou tel phénomène physique pour n'en conserver qu'un petit nombre.

3. Evolution historique des études de propagation

Une remarque doit d'abord être faite, même si elle paraît être une évidence : la propagation pour une gamme de fréquences donnée ne peut être étudiée que si on sait réaliser, dans cette gamme de fréquence, des émetteurs, des récepteurs et des antennes. Et en outre les caractéristiques de ces équipements doivent être suffisantes pour que des mesures valables soient possibles. Les connaissances en propagation sont donc très liées au développement des équipements radioélectriques.

Les premières expériences « radio » ont eu lieu à des fréquences qu'on qualifierait maintenant d'hyperfréquences et on a même pu dire qu'on avait fait plus d'hyperfréquences pendant les douze années qui ont précédé le début du siècle que pendant les trente années qui l'ont suivi. Cependant, à cette époque, les équipements n'avaient pas des performances suffisantes pour vérifier autre chose que la possibilité de la propagation hertzienne (ce qui d'ailleurs n'était pas un résultat négligeable).

De 1900 à 1930, on a connu la période des ondes de grande longueur d'onde, que l'on savait produire avec des puissances élevées, ce qui a permis d'étudier leur propagation. On a ainsi été conduit à l' « invention » de l'ionosphère qui n'était, au début, qu'une hypothèse pour expliquer certaines propagagations, que la seule diffraction autour de la terre ne permettait pas de comprendre.

Les années qui ont précédé la deuxième guerre mondiale ont vu l'élévation progressive des fréquences vers les gammes d'ondes métriques, avec la mise en service des premiers émetteurs de télévision et de quelques liaisons point à point. Pour la première fois, on pouvait étudier de façon sérieuse la propagation d'ondes qui n'étaient pas réfléchies par l'ionosphère. On a constaté alors, comme prévu, que l'horizon était une limite difficile à dépasser de façon notable, bien que, dans certaines circonstances, on puisse trouver des cas de propagation anormale à très grande distance. Ces constatations ont amené à étudier l'atmosphère en la considérant comme un

* Ce chapitre a été écrit par M. L. BOITHIAS.

ont été faits depuis quelques dizaines d'années. Une meilleure connaissance de l'ionosphère a permis cependant l'amélioration des prévisions de propagation, spécialement pour les liaisons entre points fixes. Notons à ce sujet que la gamme des ondes décamétriques qui était encore, il y a moins de vingt ans, la gamme fondamentale pour les liaisons intercontinentales, est maintenant complètement remplacée pour cet usage sur les liaisons à fort trafic par les câbles sous-marins et les satellites de télécommunications. Ces ondes sont encore utilisées pour les liaisons intercontinentales à faible trafic et pour de multiples liaisons monovoies sur des distances de quelques centaines de kilomètres (pour lesquelles elles sont d'ailleurs très mal adaptées). Elles sont aussi très utilisées pour la radiodiffusion.

Il faut cependant remarquer que ces ondes étant très influencées par l'ionosphère, l'étude de leur propagation donne des renseignements sur les propriétés physiques et radioélectriques de l'ionosphère et même de l'exosphère. Cet aspect des études de propagation est traité par ailleurs.

4.2. Fréquences comprises entre 30 MHz et 10 GHz

La propagation de ces fréquences a été beaucoup étudiée surtout à cause des applications aux liaisons point à point par faisceaux hertziens et aux radars. L'établissement des faisceaux hertziens nécessite la connaissance des affaiblissements les plus élevés que l'on puisse rencontrer afin d'éviter que la liaison ne soit coupée par la propagation, tandis que l'utilisation du radar nécessite plutôt la connaissance des affaiblissements les plus faibles, car ceux-ci correspondent aux portées les plus grandes du radar, mais aussi aux risques de détection par l'ennemi dans les applications militaires.

Nous allons mentionner quelques résultats obtenus depuis une vingtaine d'années dans cette gamme de fréquences, en considérant successivement les liaisons en visibilité et les liaisons transhorizon. Pour chacun de ces deux types de liaisons, d'une part on a obtenu des résultats statistiques directement utilisables par les ingénieurs, d'autre part on a mis en évidence les paramètres radiométéorologiques qui ont une influence prépondérante sur la propagation, ce qui permet d'extrapoler et de généraliser les résultats expérimentaux obtenus dans des conditions particulières.

4.2.1. Liaisons en visibilité

On a constaté que la profondeur des évanouissements était surtout conditionnée par l'influence de l'atmosphère pour les liaisons de longueurs supérieures à 50 km environ et par l'influence du sol pour les liaisons plus courtes. Cela tient au fait que, lorsque la longueur de la liaison augmente, la partie de l'atmosphère traversée par le faisceau augmente et, par contre, l'angle de réflexion sur le sol diminue. Or en incidence rasante tous les types de sols ont pratiquement les mêmes propriétés électriques. On a donc pu tracer des courbes-types donnant la loi de distribution des affaiblissements pour des distances

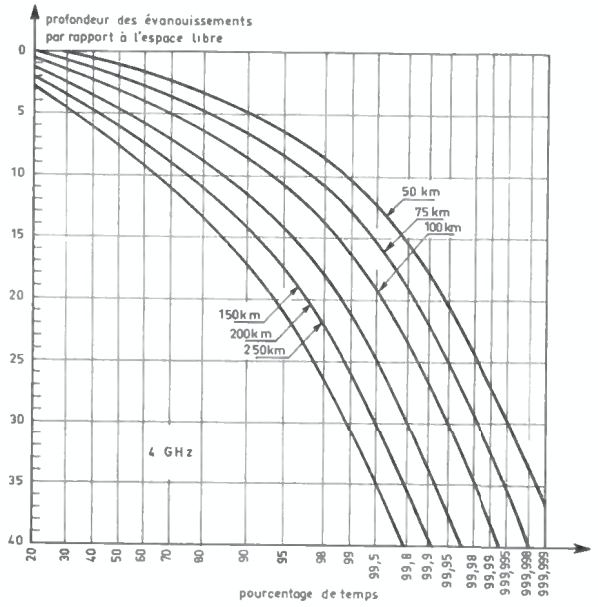


FIG. 1. — Distribution statistique des affaiblissements en visibilité (climat tempéré).

comprises entre 50 et 250 km. Un exemple en est donné figure 1 pour la fréquence de 4 GHz. Pour le moment, ces courbes ne sont établies que pour le climat tempéré, car c'est celui où les résultats statistiques sont les plus nombreux, mais des études sont en cours au CNET pour en déduire les lois de distribution dans d'autres climats, à partir des caractéristiques de l'atmosphère de ces climats comparées à celles du climat tempéré. Ces courbes ont évidemment une importance primordiale pour l'établissement de projets de faisceau hertzien.

Pour les distances plus courtes, on doit tenir compte de la rugosité du sol et diverses méthodes ont été mises au point pour cela, mais ces méthodes supposent évidemment que l'on connaisse parfaitement le relief, ce qui n'est pas toujours le cas par suite de l'absence de cartes. Il faut noter cependant que la plupart des liaisons de longueur nettement inférieure à 50 km sont (ou seront) établies sur des fréquences supérieures à 10 GHz et que, dans ce cas, les phénomènes d'absorption prennent une importance prépondérante, comme on le verra plus loin.

Une autre étude de propagation, nécessitée par les faisceaux hertziens est celle du dégagement du faisceau des antennes au-dessus du sol. Il est en effet bien évident que si un dégagement insuffisant risque de conduire à une interception du faisceau par le relief, par contre un dégagement trop important est non seulement inutilement coûteux, mais risque de conduire à des réflexions sur le sol.

Ce dégagement optimal des antennes est lui-même directement lié à la réfraction des ondes dans l'atmosphère. On sait que l'indice de réfraction décroît en général lorsque l'altitude croît et il en résulte une courbure des trajectoires vers le bas. On montre que l'on peut tenir compte de cette réfraction en considérant une propagation rectiligne mais en modifiant le rayon terrestre. Le rayon terrestre a est remplacé

milieu de propagation des ondes, ce qui a constitué la Radiométéorologie.

On a mis en évidence le rôle du gradient vertical de l'indice de réfraction dans la courbure des trajectoires, et la plupart des phénomènes constatés ont pu trouver une explication satisfaisante. En effet, à cette époque, les phénomènes de diffusion troposphérique ne se sont pas manifestés de façon évidente, d'une part à cause de la faiblesse de moyens mis en jeu (puissance d'émission, sensibilité des récepteurs) et d'autre part aussi du fait que la presque totalité des liaisons à grande distance qui étaient étudiées, étant situées au-dessus de la mer, les phénomènes de superréfraction et de propagation guidée étaient alors nettement prépondérants.

La deuxième guerre mondiale est arrivée au moment où on venait de découvrir les tubes à modulation de vitesse et les magnétrons, dont la gamme de fréquences la plus appropriée se situait vers quelques gigahertz (on parlait à l'époque de milliers de mégacycles par seconde). Comme ces ondes avaient une utilisation militaire extraordinairement importante (radar), l'étude de leur propagation a été activement poussée. La radiométéorologie s'est beaucoup développée et on a commencé à tenir compte non seulement de la réflexion, de la diffraction et de la réfraction mais aussi de l'absorption par certains constituants du milieu de propagation tels que pluie, neige, brouillard, vapeur d'eau, car ce phénomène n'était plus négligeable vers les plus hautes fréquences de la gamme centimétrique.

A la fin de la guerre, la situation était assez curieuse en ce qui concerne l'utilisation du spectre radioélectrique. D'une part, les tubes classiques, dérivés de la triode, atteignaient péniblement quelques centaines de mégahertz, d'autre part, les tubes à modulation de vitesse et les magnétrons fonctionnaient surtout au-delà de quelques gigahertz. Il restait donc un intervalle, correspondant à peu près aux ondes décimétriques, qui étaient peu utilisées, faute de tubes convenables. Cette lacune fut cependant rapidement comblée et, comme la plus grande partie de cette gamme de fréquences était attribuée au Service de Radiodiffusion, on développa des tubes très puissants (tétrodes et klystrons) pour constituer des émetteurs. Or cela provoqua une véritable découverte dans la propagation des ondes, car l'association d'émetteurs puissants, de récepteurs très sensibles et de grandes antennes permit d'étudier la propagation jusqu'à des distances très grandes. On s'aperçut alors que l'affaiblissement mesuré très au-delà de l'horizon était inférieur de plusieurs dizaines de décibels à celui qui était prévu à partir de l'ensemble des phénomènes physiques considérés jusque-là. Le nouveau phénomène physique ainsi mis en évidence était la diffusion par les hétérogénéités de l'atmosphère. Pendant plus d'une quinzaine d'années, ce phénomène fut intensément étudié aussi bien d'un point de vue théorique que du point de vue des applications pratiques (faisceaux hertziens transhorizon).

Les faisceaux hertziens à visibilité directe qui se sont développés surtout depuis la fin de la guerre, ont d'abord profité des études de propagation effectuées pour les radars car les gammes de fréquences étaient voisines. Cependant, l'influence des irrégularités de propagation étant très différente pour ces deux services, des études spéciales étaient nécessaires. L'étude de l'influence des conditions de réfraction sur le dégagement du faisceau ou sur la création de trajets multiples a obligé à affiner encore les méthodes de la radiométéorologie. Puis les bandes de fréquences inférieures à 10 GHz arrivant près de la saturation, il a fallu aller au-delà de cette fréquence, mais on est arrivé alors dans des bandes de fréquences où les phénomènes d'absorption atmosphérique jouent un rôle de plus en plus grand et c'est ce qui explique l'important développement actuel de ces études.

Enfin il y a eu les satellites. D'une part, les problèmes de propagation se sont trouvés simplifiés par le fait que l'atmosphère est traversée généralement sous un angle de site élevé et ne peut donc guère perturber la propagation sauf au-delà de 10 GHz, mais d'autre part de nouveaux problèmes sont apparus, car pour la première fois on devait établir une liaison à travers l'ionosphère. Bien que les fréquences soient évidemment choisies au-dessus de la fréquence critique, la traversée de l'ionosphère apporte quand même de sérieuses perturbations, surtout dans les gammes d'ondes métriques et décimétriques (réfraction, absorption, rotation du plan de polarisation, etc.) ce qui a amené de nouvelles recherches.

On voit donc que les études concernant la propagation des ondes ont toujours été liées au développement de la technique radioélectrique. Les divers domaines de la propagation ont été abordés non pas dans un ordre logique mais en fonction des problèmes pratiques posés à une époque donnée par la production et l'utilisation d'une certaine gamme de longueurs d'ondes.

4. Principaux progrès dans la connaissance de la propagation des ondes depuis la fin de la deuxième guerre mondiale

Bien que la deuxième guerre mondiale ait provoqué de nombreuses études de propagation, il subsistait encore bien des lacunes dans la connaissance de certains aspects de la propagation, surtout pour des fréquences élevées. Nous allons donc passer rapidement en revue les principaux progrès enregistrés pendant cette période, en divisant le domaine des fréquences radioélectriques, en trois gammes, correspondant chacune à des phénomènes prédominants différents.

4.1. Fréquences inférieures à 30 MHz

La propagation de ces ondes est surtout conditionnée par les caractéristiques du sol pour les fréquences les plus basses et par celles de l'ionosphère pour les fréquences les plus élevées.

En ce qui concerne leur utilisation pour les télécommunications, peu de progrès spectaculaires

par *Ka*, le coefficient *K* étant directement lié au gradient vertical de l'indice de réfraction. La terre apparaît de plus en plus « plate » quand le coefficient *K* augmente. Or, en un point donné au voisinage du sol, la gamme de variation des valeurs de *K* est extrêmement étendue, et on pourrait en conclure que l'on doit utiliser des pylônes extrêmement élevés si on veut que les antennes soient toujours en visibilité. Mais des études faites au CNET ont montré que l'atmosphère n'ayant pas la même structure verticale en tous points au même instant, il se produisait un effet de moyenne le long d'un trajet, et ce phénomène limite très fortement les variations de *K* pour un trajet donné. La figure 2, adoptée par le CCIR, indique les valeurs minimales de *K* que l'on peut rencontrer sur un trajet terrestre de longueur donnée en climat tempéré.

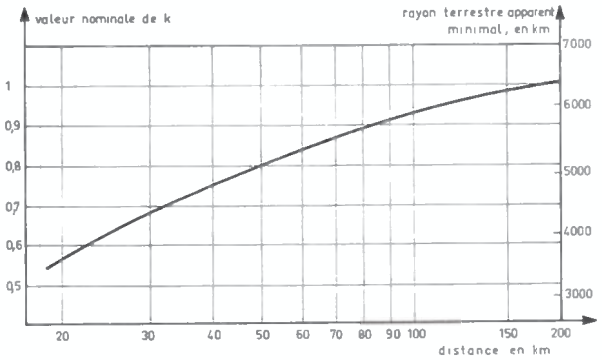


FIG. 2. — Rayon terrestre apparent minimal sur une liaison en visibilité (climat tempéré).

4.2.2. Liaisons transhorizon

Il y a une vingtaine d'années, on enseignait que : au-delà de l'horizon le champ reçu décroissait extrêmement rapidement en raison de la courbure terrestre, et la pente des courbes que l'on traçait était si impressionnante qu'elle pouvait décourager toute tentative d'expérimentation. Il y avait bien des exemples de propagation « anormale » à grande distance mais le champ considéré comme « normal » restait extrêmement faible et par suite inutilisable.

On sait que l'existence d'équipements à très grande puissance sur ondes décimétriques a permis de découvrir qu'il existait aussi, à grande distance, un autre champ « normal » qui, bien que très faible, était cependant incomparablement plus élevé que le champ de diffraction sphérique, seul connu jusqu'alors. Maintenant (fig. 3), on distingue, en fonction de la distance, pour une propagation normale :

a) La zone de visibilité directe ou d'interférence,

b) La zone de diffraction sphérique,

c) La zone dite de diffusion troposphérique.

L'étude systématique de la propagation liée à cette troisième zone a été commencée aux Etats-Unis d'Amérique vers 1950, et immédiatement de nombreuses théories ont été mises au point pour l'expliquer. Ces théories qui étaient toutes basées sur l'existence d'hétérogénéités dans l'indice de

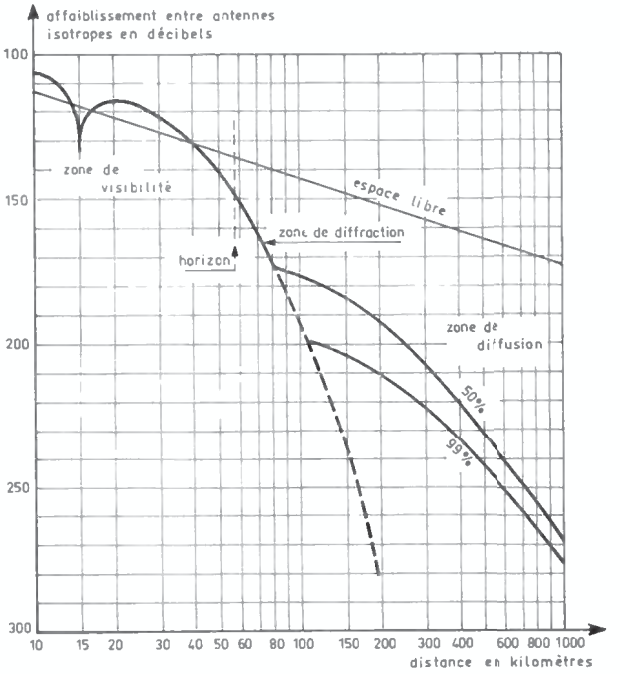


FIG. 3. — Différentes zones de propagation en fonction de la distance. Fréquence 1 GHz. Climat tempéré. Hauteur des antennes au-dessus du sol : 50 m.

réfraction atmosphérique, ont cependant donné lieu à de longues et violentes controverses qui ont maintenant pratiquement cessé. On doit d'ailleurs remarquer que ces théories ont, certes, précisé les phénomènes physiques qui intervenaient, mais elles n'ont joué qu'un rôle très faible dans l'établissement des lois de ce type de propagation, car ces lois ont été uniquement déterminées à partir de résultats expérimentaux.

En France, le CNET a apporté une très large contribution à ces études, d'abord dans le domaine théorique en montrant que les hétérogénéités de l'atmosphère avaient la structure de feuillets à peu près horizontaux, ensuite dans le domaine pratique en établissant la loi de la « baisse de gain d'antenne » et les lois statistiques de l'affaiblissement dans divers climats, et enfin en introduisant un paramètre radiométéorologique qui apparaît d'un usage universel.

La « baisse de gain d'antenne » est un phénomène qui se manifeste lorsqu'on remplace sur une liaison par diffusion troposphérique une antenne par une autre de gain plus élevé. On ne retrouve pas, dans la distribution statistique des niveaux reçus, l'augmentation du gain de l'antenne mais une valeur plus faible. On a constaté expérimentalement que ce phénomène, qui se manifeste surtout pour les antennes dont les gains dépassent 40 dB, dépend presque uniquement du gain isotrope de l'antenne et qu'il est presque indépendant de la fréquence et de la distance, contrairement à ce qu'avaient annoncé diverses théories (fig. 4).

Les mesures faites dans plusieurs pays africains montrèrent rapidement qu'il était impossible de trouver des courbes de propagation valables dans tous les climats, et que les courbes établies d'abord aux Etats-Unis et en Europe avaient, en fait, un

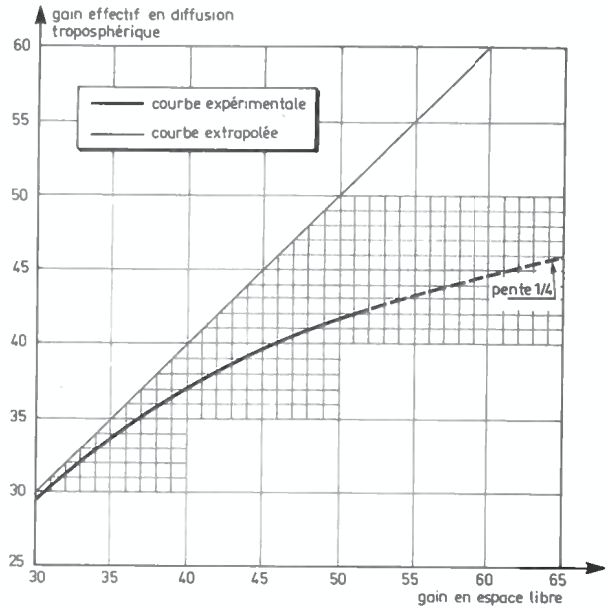


FIG. 4. — Baisse de gain d'antenne sur les liaisons dites par diffusions troposphériques.

domaine de validité très limité. Cette constatation amena à compléter la radiométéorologie par la radioclimatologie, mais compliqua beaucoup l'établissement des projets de liaison. La figure 5 donne l'affaiblissement entre antennes isotropes en climat tempéré.

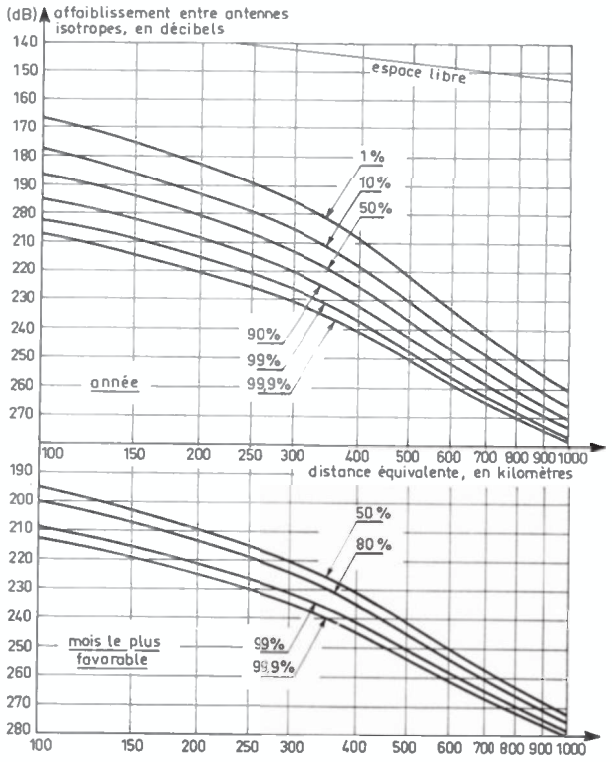


FIG. 5. — Affaiblissement moyen pour 1 MHz. Climat tempéré (trajets terrestres).

On s'aperçut aussi de l'influence du climat lorsqu'on voulut trouver un paramètre radiométéorologique représentatif, c'est-à-dire tel que ses variations soient liées de façon étroite à celles de l'affaiblissement sur un trajet. L'un des premiers paramètres utilisés fut l'indice de réfraction au voisinage du sol. Or ce paramètre donne de bons résultats dans les pays tempérés comme les Etats-Unis et l'Europe, mais par contre il a conduit à des échecs très sérieux dans d'autres climats. D'autres paramètres ont alors été proposés avec des succès divers mais, à la suite des travaux effectués au CNET, il semble bien qu'on ait mis en évidence le paramètre le plus représentatif de la propagation par les hétérogénéités de l'atmosphère. Ce paramètre est le gradient vertical de l'indice de réfraction dans le volume commun aux faisceaux des antennes. Il est valable dans tous les climats où on a pu le vérifier et non seulement il permet de prévoir l'affaiblissement de transmission mais on obtient aussi des indications très précises sur la baisse de gain d'antennes, l'influence de l'altitude et des angles de site aux extrémités, et la largeur de bande transmissible. En ce qui concerne l'affaiblissement de transmission, on a même pu établir une formule d'usage absolument général donnant cet affaiblissement en décibels à partir de la fréquence en mégahertz, de la distance en kilomètres et du gradient dans le volume commun en unités N par kilomètre :

$$A = 30 \log f + 30 \log d + 1{,}5\, G_c + 102.$$

Le gradient dans le volume commun est évidemment calculé à partir des sondages météorologiques classiques et l'utilisation de cette formule est surtout limitée par le faible nombre de sondages effectués dans certaines régions.

4.3. Fréquences supérieures à 10 GHz

Lorsque la fréquence dépasse 10 GHz, un autre phénomène apparaît qui est l'absorption par divers constituants de l'atmosphère, en particulier l'oxygène, la vapeur d'eau et l'eau sous forme liquide ou solide (pluie, brouillard, neige, grêle). Ce phénomène devient de plus en plus important à mesure que la fréquence s'élève, et il finit même par devenir le phénomène essentiel.

D'un point de vue physique l'absorption apportée par ces divers éléments est connue depuis longtemps avec une précision satisfaisante. On sait que l'oxygène a deux zones principales d'absorption dans la gamme des ondes millimétriques, situées respectivement à 60 GHz et à 118,75 GHz. La première qui donne, au niveau du sol, un affaiblissement de 14 dB/km, se résout en de nombreuses raies lorsque la pression diminue, c'est-à-dire en altitude.

La vapeur d'eau a aussi deux zones d'absorption, l'une située à 22,2 GHz qui donne un affaiblissement de 0,02 dB/km par gr/m³, l'autre située à 183 GHz qui donne un affaiblissement de 4 dB/km par gr/m³.

La pluie apporte un affaiblissement qui augmente très rapidement avec la fréquence et qui est d'autre part presque proportionnel à l'intensité de précipitation. On voit sur la figure 6 que la pluie représente l'élément essentiel de l'affaiblissement, même pour des intensités de précipitations moyennes.

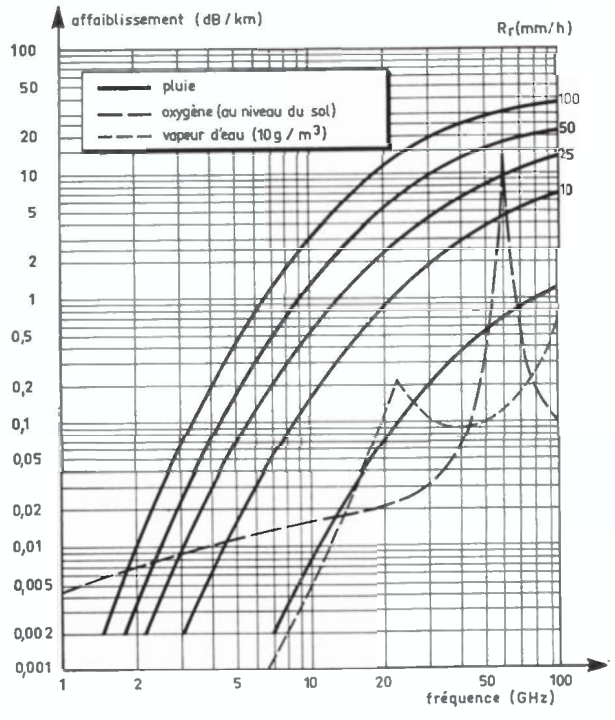


FIG. 6. — Affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique.

Cependant le problème essentiel de l'absorption est surtout un problème météorologique et non radioélectrique. En effet, si on connaît assez bien l'affaiblissement kilométrique apporté par une pluie d'intensité donnée, on connaît beaucoup moins bien le nombre de kilomètres sur lesquels la pluie tombe simultanément avec cette intensité. Aussi on a développé depuis quelques années des systèmes précis et automatiques pour mesurer l'intensité de la pluie et surtout sa répartition géographique et temporelle, que les mesures météorologiques courantes ne donnent pas.

L'absorption par l'atmosphère limite évidemment la longueur des liaisons que l'on peut réaliser, mais peut-être moins qu'on ne le craint actuellement. En effet, pour une liaison entre deux points à la surface de la terre, la probabilité d'avoir une pluie continue sur tout le trajet diminue à mesure que le trajet augmente, et pour une liaison avec un satellite, la traversée de l'atmosphère représente seulement quelques kilomètres si le satellite n'est pas très bas sur l'horizon. Il est donc vraisemblable que les fréquences supérieures à 10 GHz seront utilisées pour les liaisons avec les satellites, en installant au besoin, à la surface de la terre, deux antennes de réception suffisamment espacées pour que la probabilité d'avoir une pluie intense simultanée aux deux emplacements soit très faible.

5. Conclusion

Ce rapide survol de la propagation des ondes dans les régions non ionisées de l'atmosphère ne peut pas donner une idée complète de ce vaste problème. Il permet de voir cependant que ce domaine est maintenant largement défriché. Bien que la découverte d'un nouveau mode de propagation ne puisse jamais être exclue, elle semble cependant assez peu probable. Mais toutes les études ne sont pas terminées pour autant car on a besoin de connaître la propagation avec une précision de plus en plus grande, en raison de l'augmentation de la fiabilité des équipements radioélectriques. En effet, la fiabilité est telle maintenant que la plupart des interruptions risquent d'être causées par la propagation, si l'importance de celle-ci a été sous-estimée au moment de l'installation. Enfin les liaisons spatiales et l'utilisation des fréquences supérieures à 10 GHz ont créé de nouveaux problèmes de propagation qui donneront des sujets de recherche pendant de nombreuses années.

L'IONOSPHÈRE ET LA RADIO*

1. Introduction

L'image qu'on peut se faire aujourd'hui de l'environnement terrestre diffère considérablement de celle qui était accessible aux générations précédentes. La Terre ne peut plus être représentée comme une planète isolée du système solaire, entourée d'une mince couche d'atmosphère, ionisée dans sa partie supérieure et ne subissant qu'occasionnellement les contre-coups de l'agitation solaire. On doit considérer, au contraire, la Terre et son champ magnétique propre (la magnétosphère) comme un ensemble mille fois plus long que le rayon terrestre, baignant dans l'atmosphère même du Soleil (le vent solaire), l'une et l'autre interagissant en permanence. L'ionosphère est moins alors la couche supérieure ionisée de l'atmosphère, que la base de la magnétosphère, à son contact avec la couche isolante, qui entoure la planète sur quelques fractions de son rayon (l'atmosphère).

L'emploi des techniques radioélectriques a contribué de façon majeure à acquérir cette vue nouvelle. Longtemps limitée dans ses possibilités d'application à l'étude du milieu, en raison de l'existence d'un maximum d'ionisation, la propagation des ondes radioélectriques a pu surmonter cette limitation aux couches inférieures de l'ionosphère, soit en faisant appel, à partir du sol, à des phénomènes de propagation nouveaux que les progrès théoriques et techniques permettaient de mettre en œuvre, soit en utilisant les véhicules spatiaux comme support des mesures.

Dans cette brève revue du progrès des connaissances ionosphériques, on se limitera à l'examen de quelques-unes de ces techniques radioélectriques nouvelles et à un aperçu des conséquences de leur emploi dans la compréhension de l'ionosphère, malgré le côté quelque peu arbitraire d'une séparation entre ionosphère, magnétosphère et atmosphère.

2. Les méthodes radio nouvelles au sol

Parmi les techniques radio nouvelles utilisées à partir du sol, l'emploi de la diffusion incohérente

* Ce chapitre a été écrit par M. F. DU CASTEL.

par le plasma ionosphérique a certainement été la plus productive. Le phénomène de diffusion incohérente, prévu théoriquement par W. GORDON en 1958 et confirmé expérimentalement par K. BOWLES, la même année, est actuellement utilisé par cinq stations, dont celle de Saint-Santin-Nançay en France, sous la responsabilité du CNET.

Au prix d'une installation coûteuse par ses dimensions (puissances élevées, grandes antennes, analyse complexe), les paramètres du milieu qui interviennent dans le spectre du signal diffusé peuvent être mesurés avec une grande précision, sans autre limitation que le rapport signal/bruit. Les principaux paramètres sont déduits de la composante ionique du spectre du signal diffusé. Le premier est évidemment la densité électronique, puisque la diffusion est proportionnelle au nombre d'électrons. Les systèmes actuels permettent d'atteindre 10^3 électrons/cm^3, avec une définition en altitude largement inférieure à l'échelle de hauteur du milieu. Les deuxièmes paramètres sont les températures des électrons et des ions, puisque ce sont les fluctuations thermiques des électrons, eux-mêmes influencés par la présence des ions, qui sont à l'origine du signal diffusé. Le troisième est la composition ionique du milieu, puisque ce sont les ions, plus lourds qui commandent le mouvement des électrons. Le quatrième est la dérive des ions, elle-même liée aux mouvements de l'atmosphère neutre et aux champs électriques, qui se traduit par un déplacement Doppler de tout le spectre. Cependant la restitution spatiale du vecteur vitesse suppose un système pluristatique, dont le premier modèle sera probablement le système français, lorsqu'il sera complété par deux stations supplémentaires dans le courant de 1972. Un cinquième paramètre, accessible à basse altitude, lorsque les collisions avec les neutres entrent en jeu, est la composition de l'atmosphère neutre et il est piquant de remarquer cette application indirecte, imprévue à l'origine, qui permet de déduire d'un phénomène de plasma les propriétés du milieu neutre. Un sixième paramètre provient de la composante électronique du spectre, qui se trouve décomposée en deux raies, distantes de la fréquence de travail d'une quantité voisine de la fréquence du plasma. Les oscillations électrostatiques du plasma, à l'origine de cette composante, sont renforcées par les photoélectrons superthermiques de vitesse de phase convenable, et il est ainsi possible d'atteindre un aspect des échanges ionosphère-magnétosphère, avec les systèmes assez sensibles pour détecter ces raies. Enfin, la situation géophysique particulière ou les caractéristiques propres de certains systèmes permettent quelques autres mesures intéressantes, sinon aussi importantes.

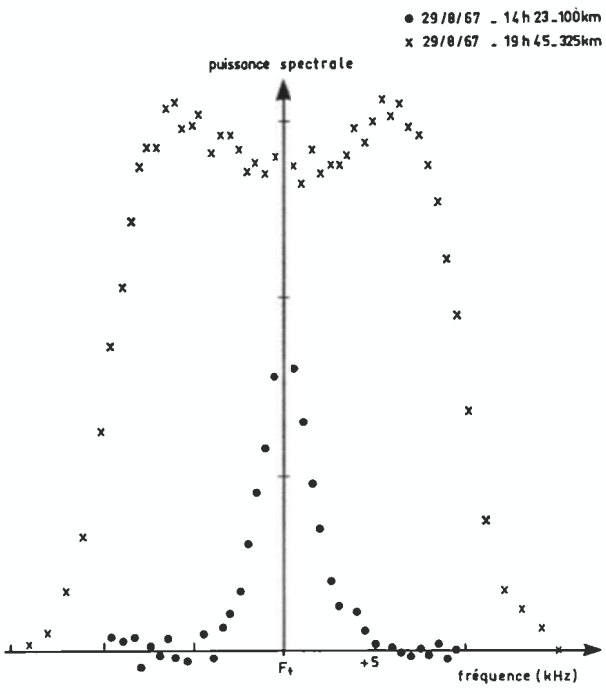


FIG. 1. — Spectres expérimentaux obtenus avec le sondeur à diffusion incohérente de Saint-Santin-Nançay (d'après WALDTEUFEL, 1970).

Pour le spectre le plus large, obtenu vers le maximum d'ionisation de la couche F, on peut constater la précision du tracé des points expérimentaux. C'est cette précision qui permet de jouer sur plusieurs paramètres à la fois pour ajuster une courbe théorique. Le rôle différent joué par chaque paramètre sur la forme du spectre et des relations empiriques entre eux servent de guide pour réduire le temps de travail du calculateur. Pour le cas particulier du déplacement global du spectre dû au mouvement de l'ionisation, la précision sur les flancs du spectre permet de détecter un décalage de l'ordre du hertz.

Pour le spectre le plus étroit, obtenu à basse altitude, lorsque les collisions interviennent, le changement de forme du spectre permet de détecter et de mesurer cette intervention.

On notera que la précision expérimentale du spectre peut être obtenue malgré un rapport signal/bruit inférieur à l'unité, par une intégration de quelques minutes.

L'énumération de tous ces paramètres mesurables montre la puissance de la technique de diffusion incohérente, qui, grâce au progrès simultané de l'interprétation théorique du phénomène et des techniques de mesure, a apporté une contribution majeure à la compréhension des processus ionosphériques. On conçoit cependant que la précision de mesure d'un des paramètres décroît avec le nombre de paramètres inconnus. C'est seulement grâce à des hypothèses sur les lois liant certains des paramètres entre eux qu'il est possible de concentrer l'effort sur l'étude de l'un d'eux.

Bien qu'on ait choisi de prendre, dans cet exposé, la diffusion incohérente comme exemple significatif des progrès récents, il ne faudrait pas en conclure que d'autres techniques radio employées à partir du sol n'ont pas joué, elles aussi, leur rôle dans le progrès des connaissances. On se contentera cependant de citer les mesures des signaux naturels à très basse fréquence, ou celles à extrêmement basse fréquence, à la limite de la radio et du magnétisme. L'origine de ces signaux, dus notamment aux interactions entre ondes et particules de la magnétosphère, et leur propagation, liée à la structure du champ magnétique terrestre et aux conditions d'émergence dans l'atmosphère, permettent d'atteindre à distance les propriétés des milieux traversés et les phénomènes dont ils sont le siège, et représentent un moyen d'investigation fort important. On n'oubliera pas, par exemple, que c'est la détection des sifflements naturels au sol, qui a permis à CARPENTER, à partir de 1965, de mettre en évidence le confinement du plasma magnétosphérique en deça de quelques trois rayons terrestres (la plasmasphère). L'intérêt de telles mesures s'accroît

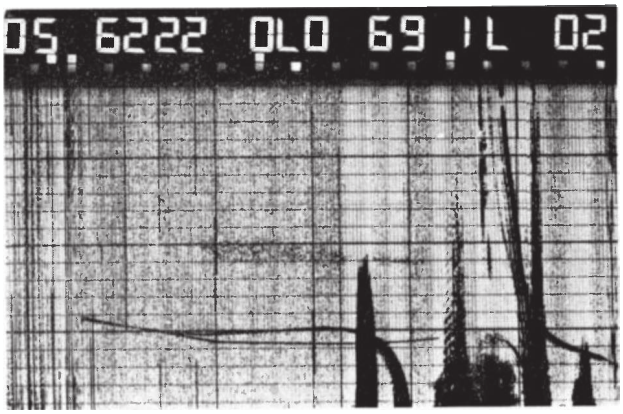
lorsqu'elles peuvent avoir lieu simultanément aux deux extrémités d'une même ligne de force, à haute latitude, comme c'est le cas entre la Russie du Nord et les îles françaises de l'Océan Indien.

3. Les méthodes radio nouvelles en satellites

A l'utilisation des méthodes de propagation à partir du sol, c'est-à-dire en un point fixe, les véhicules spatiaux sont venus ajouter la possibilité de mesures à partir du milieu à étudier lui-même, avec la caractéristique, pour la plupart des satellites, d'un déplacement rapide dans l'espace. On retiendra comme exemple, en raison de l'intérêt de ses prolongements, la méthode de sondage à fréquence variable.

C'est initialement pour compléter par une vue d'en haut les sondages classiques en contre-bas de l'ionosphère, que furent lancés, à partir de 1962, les satellites canadiens Alouette et Isis. La restitution des profils de densité électronique, tout autour du globe, entre l'altitude des satellites (1 000 km, puis jusqu'à 3 500 km) et le maximum d'ionisation, fournirent des données expérimentales qui servirent de base à l'interprétation de phénomènes connus (la distribution intertropicale de l'ionisation) ou à la découverte de phénomènes nouveaux (le synclinal subauroral de l'ionisation). Mais à ces résultats, espérés sinon attendus, s'ajouta l'apparition d'un phénomène insoupçonné, se présentant, sur les ionogrammes en contre-haut, sous forme de « flèches » aux fréquences de résonance du plasma. Une interprétation simple en fut rapidement donnée, qui revenait à traduire la non-propagation de l'onde émise pour les fréquences correspondant à une annulation de la vitesse de groupe dans le plasma. Mais une analyse plus précise du phénomène montra une structure fine complexe de ces résonances ; et il fallut se livrer à une étude théorique plus approfondie des conditions de propagation, ou, plus exactement, de relaxation, au voisinage des fréquences de résonances du plasma, pour trouver une interprétation de leurs structures modulées. On montra ainsi que deux trajets courbés peuvent exister à des fréquences voisines, lesquels, en recoupant la trajectoire du satellite, donnent naissance à un battement, à l'origine de la modulation observée. La découverte est intéressante à deux points de vue : d'une part, le phénomène n'existe que dans l'hypothèse d'un plasma chaud et il apparaît ainsi possible d'atteindre outre la densité électronique ou la valeur du champ magnétique qui fixent la valeur des fréquences de résonance, une estimation de la température des électrons ; d'autre part, le trajet de propagation impliquant une certaine distance du satellite, les mesures ne souffrent plus des conditions d'environnement proche, qui, dans une situation mal connue, perturbent les mesures purement locales par les techniques classiques des sondes à plasma. Expérimentée en fusée, la méthode doit donner d'intéressants résultats en satellites.

Bien entendu, d'autres exemples pourraient être donnés, où les techniques de propagation sont utilisées en satellite. On peut ainsi rappeler que le premier



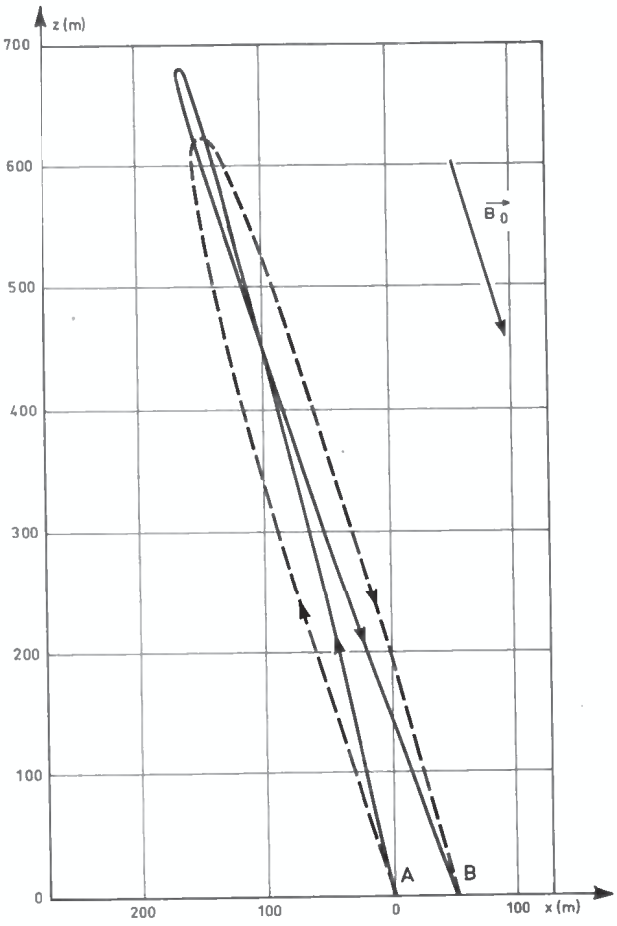


FIG. 2. — Exemple et interprétation de flèches de résonances. Sur cet ionogramme, obtenu par le satellite Alouette 2 (d'après FELDSTEIN, 1971), on voit la présence de « flèches » de résonances correspondant aux fréquences caractéristiques du plasma ou à leurs harmoniques. Sur l'une d'entre elles, en l'occurrence à la fréquence hybrique haute (moyenne quadratique de la fréquence de plasma et de la gyrofréquence), on distingue clairement une modulation, d'ailleurs plus facile à mesurer dans une représentation amplitude-temps que temps-fréquence comme ici.

Cette modulation correspond au battement de deux ondes à des fréquences très voisines de la résonance, pouvant se propager suivant deux trajets différents. Dans la représentation spatiale de la figure (d'après BITOUN, GRAFF, AUBRY, 1970), les deux ondes émises en *A* recoupent en *B* la trajectoire du satellite, après un trajet s'étant éloigné de quelques centaines de mètres du satellite dans la direction moyenne du champ magnétique B_0.

satellite français FR1, utilisa la propagation des ondes très basses fréquences, et que d'autres, depuis, ont exploré les caractéristiques des signaux qui, dans les gammes très basses, se propagent dans le plasma spatial.

4. L'état des connaissances

Sans prétendre à un bilan exhaustif des connaissances sur l'ionosphère, dans le cadre de cet exposé, on peut tenter d'en dégager quelques traits. L'ionosphère doit être d'abord replacée dans le contexte des relations Soleil - Terre. On possède maintenant un modèle global acceptable de la magnétosphère, au moins dans ses grandes lignes et en période calme. Ce modèle trace les limites du confinement du champ magnétique terrestre et, à son intérieur, celles du plasma thermique et les zones d'actions des particules énergétiques. Les voies d'échange, en énergie et en matière, entre le milieu interplanétaire, sous l'action directe du Soleil, et l'intérieur de la magnétosphère sont assez bien comprises, avec le rôle prépondérant joué par la queue de la magnétosphère, du côté opposé au Soleil. Cependant les modèles sont encore essentiellement statiques et leur dynamique, devant les actions discontinues de l'agitation solaire, demeure un sujet controversé.

Pour l'ionosphère proprement dite, l'état des connaissances reflète assez bien celui de la magnétosphère. Pour les régions de basses et moyennes latitudes, les moins influencées par les événements extérieurs, l'interprétation satisfaisante de la structure intertropicale (l'anomalie équatoriale), par des échanges d'ionisation le long de l' « arche » magnétique équatorial, apporte une réponse à l'un des grands problèmes ionosphériques. La compréhension globale de l'ionosphère a permis aux Unions internationales d'entreprendre la première mise au point d'une « ionosphère internationale de référence », de même qu'il avait été possible de le faire pour l'atmosphère (modèle CIRA), une décennie plus tôt. Cependant, pour l'ionosphère comme pour l'atmosphère, l'existence d'un modèle ne signifie nullement la compréhension des mouvements et de la dynamique du système. C'est là d'ailleurs un des pôles d'intérêt des ionosphéristes et l'on peut espérer que les mesures par diffusion incohérente (systèmes multistatiques), apporteront des résultats décisifs, alors que les mesures en véhicules spatiaux demeurent difficiles, en raison des champs propres induits par le mouvement du véhicule (force de Laplace). Mais la compréhension réelle de la dynamique de l'ionosphère ne pourra qu'être globale, c'est-à-dire qu'elle implique une connaissance des interfaces en altitude et en latitude. Or, par un paradoxe apparent, ce sont les régions les plus basses de l'ionosphère qui demeurent les plus mal connues, faute de techniques satisfaisantes. Si des progrès importants ont été accomplis dans la mise en évidence des mouvements de l'atmosphère neutre (ondes de gravités et marées), les techniques de mesure directe de la région *D* font encore défaut. Les espoirs se portent, sans être encore bien fixés, sur la technique des réflexions partielles, sur la compression d'impulsion (« chirp radar ») ou sur les promesses du « lidar » (diffusion laser sur des raies moléculaires de constituants de l'atmosphère). Quant à l'interface en latitude, il met en cause les régions aurorales et polaires, où la situation des connaissances est moins avancée.

Les régions aurorales constituent le lieu privilégié des échanges magnétosphère - ionosphère, en raison de la structure même de celle-là. Si les données morphologiques, tant spatiales que terriennes, commencent à être abondantes dans ces régions, les interprétations, elles, ne sont pas encore satisfaisantes. Les idées ont beaucoup évolué sur les modes d'action de la magnétosphère dans les régions aurorales et, si la description des processus est assez avancée (« ovale auroral », « sous orages »), malgré le peu d'information sur les champs électriques, les théoriciens ne sont pas encore d'accord sur la localisation des processus d'accélération nécessaires à l'interprétation des phénomènes. L'importance des efforts actuellement consacrés à ce problème devrait cependant aboutir, à assez brève échéance, à une représentation acceptable de la dynamique des régions aurorales, que des expériences plus spécifiques auront à confirmer. Quant aux régions proprement polaires, la complexité des phénomènes et des événements, et le trop faible nombre de données, n'ont pas encore permis d'atteindre un stade aussi avancé et le stade descriptif des phénomènes est actuellement peu dépassé.

Cette brève revue de l'état des connaissances sur l'ionosphère donnerait une idée fausse de la réalité, si l'on omettait l'importance du plasma spatial comme champ d'expériences de physique, non réalisables dans les conditions du laboratoire. Des études telles que celles mentionnées plus haut sur les résonances ou les interactions ondes-particules sont au moins aussi intéressantes par les progrès qu'elles permettent de faire dans le domaine de la physique des plasmas, que par les connaissances géophysiques qu'elles apportent sur le milieu lui-même. Cette orientation nouvelle des recherches ionosphériques, devenue possible par une meilleure connaissance du champ d'expérience et par les techniques nouvelles applicables, se traduit par un attrait certain des physiciens vers un domaine jusque là réservé aux seuls géophysiciens.

Par une évolution naturelle, l'ionosphère, après sa découverte par des radioélectriciens, a été d'abord étudiée en tant que milieu de propagation des ondes ; puis la fin est devenue le moyen et ce sont les propriétés de propagation des ondes, raffinées par les théoriciens des plasmas, qui ont servi à l'étude du milieu lui-même, aux côtés, bien entendu, des techniques optiques ou magnétiques.

A. BOISCHOT

Radio-Astronome
Observatoire de Paris
Président de la
6e section de la SFER

La radioastronomie

1. Un peu d'histoire

Quand *L'Onde Electrique* vit le jour, il y a 50 ans, personne ne se doutait que les plus puissants des émetteurs radio existaient dans l'Univers depuis déjà des milliards d'années. Ce n'est qu'en 1933 qu'accidentellement, l'ingénieur américain Karl JANSKY découvrit le rayonnement de la Galaxie sur 20 MHz, et il fallut attendre 1945 pour que la Radioastronomie commence à se développer.

La découverte de JANSKY aurait pu être faite plus tôt : dès la fin de la première guerre mondiale, les techniques radio étaient suffisamment développées pour permettre la détection des radiosources les plus intenses. Mais, malgré le travail de quelques pionniers, vers 1900, personne ne songeait à ce nouveau moyen d'étude de l'Univers. Par contre, en 1945, les armées alliées rendaient à la vie civile un nombre important d'ingénieurs et de techniciens qui avaient fait leurs preuves pendant la guerre dans les sections de radars et de transmissions ; la radioastronomie, nouvellement découverte, leur offrait un champ d'activité où leurs compétences pouvaient se développer. C'est ainsi que, en particulier aux USA, en Angleterre et en Australie, la radioastronomie fut d'abord le domaine d'ingénieurs radio. Ce n'est que peu à peu que les astronomes s'y intéressèrent et réalisèrent tout ce que pouvait apporter cette nouvelle technique d'observation de l'Univers, car la radioastronomie est, avant tout, une simple branche de l'astronomie. Ses résultats s'ajoutent à ceux obtenus dans les autres domaines dans un même but : mieux connaître et comprendre l'Univers qui nous entoure.

La radioastronomie est bien connue à cause des instruments gigantesques qu'elle a dû et doit encore construire. Les vieilles antennes de radars, récupérées dans les surplus militaires et qui servirent aux premières observations, furent rapidement insuffisantes. Pour augmenter leur sensibilité, on se mit à construire des instruments de plus en plus grands, « radiotélescopes » spécialement conçus pour la réception des faibles signaux que nous envoient les astres. Jodrell Bank, en Angleterre, Parkes en Australie, Green Bank aux USA, Nançay en France, Arecibo à Porto Rico, Bonn en Allemagne sont parmi les plus grands.

Ces instruments ont permis de nombreuses découvertes, certaines connues de tous, comme celles de ces astres nouveaux aux noms étranges que sont les quasars et les pulsars, d'autres qui frappent moins l'imagination mais n'en sont pas moins importantes pour l'astronomie comme les émissions solaires, le rayonnement de l'hydrogène neutre ou les raies des molécules interstellaires. La radioastronomie est devenue un domaine trop vaste pour qu'on puisse en résumer les résultats en quelques pages.

En France, les premières recherches en radioastronomie furent entreprises, dès 1945, au laboratoire de physique de l'Ecole Normale Supérieure. Des antennes furent d'abord placées sur le toit des bâtiments de la rue d'Ulm, puis à Marcoussis, près

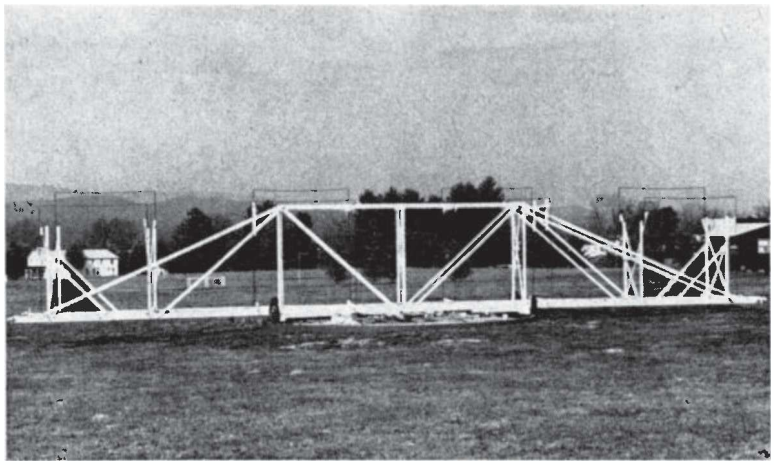


FIG. 1. — Le premier radiotélescope : antenne utilisée par K. Jansky lors de la découverte du rayonnement radiocosmique.

de Montlhéry. Des résultats importants furent obtenus sur le rayonnement du Soleil et de la Galaxie, avec des antennes de quelques mètres de diamètre. Mais la Station de Marcoussis était trop petite pour permettre l'installation de grands instruments. D'autre part, le développement du trafic aérien, des lignes à haute tension et des activités industrielles dans la région parisienne, s'est accompagné d'une croissance considérable du niveau des parasites, qui limitent, en pratique, la sensibilité des observations radioastronomiques.

Ce sont les raisons pour lesquelles, en 1953, fut entreprise la construction de la station de Nançay en Sologne, qui se situe actuellement parmi les grands observatoires radioastronomiques mondiaux.

FIG. 2. — Vue aérienne du grand radiotélescope de Nançay (Cher). Au premier plan, le réflecteur fixe, de 35 m de haut et 300 m de long ; au fond le réflecteur plan ; au centre le laboratoire et le système focal. A l'arrière-plan, on devine les 32 antennes de l'interféromètre solaire.

Le premier grand instrument, un interféromètre sur 169 MHz à 32 antennes alignées sur une base Est-Ouest de 1,5 km de long, fut terminé en 1966, et fut suivi de nombreux autres, interféromètres à deux antennes mobiles, réseau sur 3 cm et sur 408 MHz, réseau Nord-Sud à 8 antennes, etc. En 1960 commençait la construction d'un grand radiotélescope composé d'un réflecteur plan de 200 m de long et 40 m de haut, inclinable, et d'un réflecteur sphérique de 300 × 35 m. Cet instrument qui peut fonctionner jusqu'à 6 cm de longueur d'onde, est spécialement conçu pour l'étude des radio-sources galactiques et extragalactiques. Mais il est également utilisé pour observer le Soleil et les planètes et, en collaboration avec le Centre National d'Etude des Télécommunications, pour sonder l'ionosphère terrestre.

La station de Nançay est maintenant rattachée à l'Observatoire de Paris-Meudon, où se trouvent la quasi-totalité des radioastronomes français.

L'Observatoire de Bordeaux s'intéresse également à la radioastronomie et est en train de construire un grand instrument destiné à l'étude du Soleil sur ondes millimétriques.

2. Pourquoi la radioastronomie ?

Jusqu'au XX^{e} siècle, l'homme dut se contenter d'observer le ciel dans le seul domaine dans lequel son œil est sensible, celui des ondes visibles. Mais il est maintenant évident que ces ondes ne transportent qu'une faible proportion des informations que les astres nous envoient. Certaines émissions, en particulier les ondes de très courte longueur d'onde, ultraviolet et rayons X, et les particules (rayons cosmiques), ne peuvent atteindre la surface de la terre, car elles sont absorbées dans l'atmosphère. Il faudra donc utiliser des fusées ou satellites artificiels pour les observer. Il n'en est pas de même des ondes radio, entre 1 mm et 30 m de longueur d'onde, qui sont facilement détectables sur terre.

L'étude de ces ondes s'est révélée particulièrement intéressante, beaucoup plus qu'on pouvait le prévoir. Cet intérêt est principalement lié à l'origine du rayonnement radio, qui est très différente de celle du rayonnement visible. Alors que ce dernier prend généralement naissance dans les milieux relativement denses et peu ionisés, les ondes radio sont émises avec une intensité considérable par les gaz très diffus et ionisés, souvent en présence d'un champ magnétique. Les astres que nous « verrons » en radioastronomie seront donc souvent différents des astres connus en optique. Par exemple, aucune étoile normale n'a encore été détectée en radioastronomie, alors que les radiosources les plus intenses correspondent à des objets à peine détectables avec les plus puissants des télescope optiques.

L'étude des ondes radio permet d'étudier des gaz raréfiés : couronne solaire, particules piégées autour des planètes, nuages interplanétaires ou galaxies en explosion. L'intensité, le spectre, la polarisation, les variations du rayonnement apportent des informations sur la température, la densité, le champ magnétique, les particules énergétiques dans la source, etc.

D'autre part, la radioastronomie a une influence considérable sur l'astronomie optique en indiquant, parmi les milliards d'astres qui apparaissent sur les clichés, ceux qui sont particulièrement intéressants.

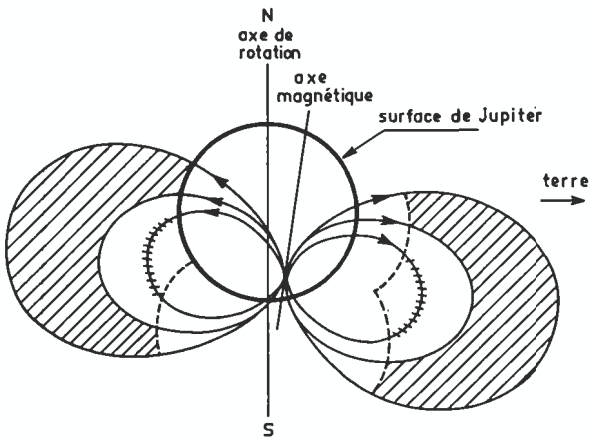


FIG. 3. — Le champ magnétique de Jupiter tel qu'il est déduit de l'observation des émissions radio. Les zones hachurées correspondent aux zones de van Allen qui rayonnent sur ondes centimétriques et décimétriques.

C'est le cas par exemple des quasars, qui ont été découverts grâce à leur émission radio, mais dont la distance ne peut être déterminée que par leur observation dans le domaine visible.

3. Quelques résultats parmi d'autres

Quelques exemples, choisis parmi les nombreux résultats obtenus ces dernières années, montreront la diversité de ces découvertes.

3.1. Le champ magnétique de Jupiter

L'observation optique des planètes nous permet d'étudier leur surface et leur basse atmosphère, mais ne peut nous renseigner sur leur champ magnétique Par contre, l'existence d'une émission radio est généralement liée à la présence d'un champ magnétique.

Or Jupiter est l'une des radiosources les plus intéressantes du ciel et l'une des plus intenses sur certaines fréquences. En plus de l'émission thermique de sa surface, on a pu détecter deux émissions d'origines différentes.

L'une, surtout intense dans le domaine des ondes décimétriques, est due à des électrons de grande énergie, piégés par le champ magnétique de la planète dans une ceinture analogue à celle découverte autour de la terre par van Allen. On peut effectivement voir que l'émission radio provient d'une source deux à trois fois plus étendue que le disque visible de la planète, et plus précisément de deux sources situées, dans le plan équatorial, de chaque côté de ce disque.

L'autre source de rayonnement, sous forme de sursauts brefs, fait de Jupiter la source la plus intense du ciel sur ondes décamétriques. L'émission provient de régions bien localisées de l'ionosphère ou de la magnétosphère jovienne et n'est observée que si Io, un des satellites de Jupiter, est dans une position favorable. Cette émission est également sous la dépendance du champ magnétique jovien.

Dans les deux cas, l'étude détaillée de la position des sources, et des variations du rayonnement en fonction de la rotation de la planète, en particulier de la polarisation de ce rayonnement, a permis de montrer que le champ magnétique était environ dix fois plus intense que sur terre, et correspondait au champ d'un dipôle incliné de 11° sur l'axe de rotation de la planète et légèrement excentré.

Ces données sont très importantes à connaître pour ceux qui étudient l'origine des planètes et celle du champ magnétique sur terre.

3.2. Les pulsars et les étoiles à neutrons

En 1968, l'Anglais HEWISH annonçait la découverte d'un type de radiosource tout à fait nouveau, l'émission se présentait sous forme d'impulsions très brèves (quelques millisecondes) arrivant à des intervalles parfaitement constants, de l'ordre de 0,5 à 2 s, suivant les sources. Ces caractéristiques sont à l'origine du nom de *pulsars*.

On en connaît maintenant une cinquantaine et leur distribution montre qu'il s'agit d'objets situés dans notre Galaxie. La découverte d'un pulsar au centre de la nébuleuse du Crabe, reste d'une étoile ayant explosé il y a environ 900 ans, a permis de vérifier que ces pulsars étaient, en réalité, des étoiles à neutrons. Ces dernières, dont l'existence était prévue par les théories de l'évolution stellaire, n'avaient encore jamais été observées. Il s'agit d'étoiles composées de matière supercondensée, gaz de neutrons, dont la masse est voisine de celle du soleil, mais dont le diamètre est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres seulement. L'étude des variations de la période des pulsars permet de suivre l'évolution des étoiles à neutrons. Les variations de leur émission radio renseignent aussi sur le milieu interstellaire ; l'origine même de ces émissions pose d'intéressants problèmes aux théoriciens des plasmas.

3.3. Les molécules interstellaires

Quelques molécules, comme CN, CH et CH+ avaient été, depuis longtemps, détectées par leur spectre de raies dans le domaine visible. En 1963, la première raie moléculaire était découverte en radioastronomie, en provenance du radical OH ; en réalité trois raies étaient détectées au voisinage de 18 cm de longueur d'onde, dans certains nuages déjà connus pour leur émission continue dans le spectre radio (régions H II). Les caractéristiques de ces raies : intensités relatives, polarisation, variabilité, etc., étaient tout à fait inattendues et il faut, pour en rendre compte, admettre qu'elles sont émises par un processus cohérent comme l'effet maser.

En 1968, l'exploration du spectre radio révéla que des raies de nombreuses autres molécules étaient détectables en provenance de certaines régions H II ou du gaz interstellaire. La présence de molécules simples comme l'eau H_2O, l'ammoniac NH_3, l'oxyde de carbone CO, fut d'abord mise en évidence. Puis

celle de molécules plus complexes comme l'aldéhyde formique HCHO, l'acide formique H_2CO_2, la cyanure d'hydrogène HCN. A l'heure actuelle, plusieurs nouvelles raies sont détectées chaque mois, principalement en ondes millimétriques et centimétriques.

L'étude de ces raies est particulièrement intéressante. Elle apporte des résultats très nouveaux pour le problème de la stabilité des molécules et sur l'origine des molécules complexes dans l'Univers. H_2O, comme OH émet souvent d'une manière cohérente, par effet maser, ce qui pose des problèmes très intéressants.

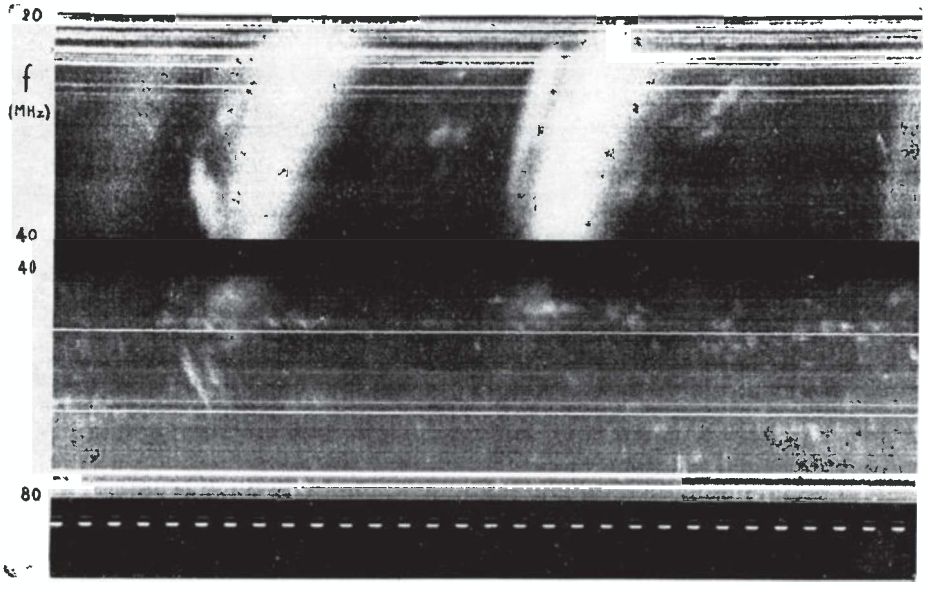


FIG. 4. — Spectre dynamique de sursauts solaires en ondes décamétriques obtenu à Nançay. En bas : marques de temps toutes les deux secondes. Les traits horizontaux sont dus à des parasites.

Enfin il est également possible de faire l'analyse isotopique des molécules. Par exemple, dans le cas du cyanure d'hydrogène, on a détecté les raies de $H^{12}C^{14}N$ et de $H^{13}C^{14}N$, ce qui permet de déterminer le rapport H^{12}/H^{13} et de comparer sa valeur à celle que nous observons sur terre ou dans les étoiles : une nouvelle ère est ouverte pour l'étude de la formation des éléments dans l'Univers.

4. Les techniques de la radioastronomie

Les problèmes que pose la détection des ondes extraterrestres ne sont pas essentiellement différents de ceux que rencontrent tous les jours les radioélectriciens. Deux caractéristiques de ces ondes confèrent cependant une certaine originalité aux techniques de la radioastronomie. D'une part, ces ondes ont la nature d'un bruit incohérent de très faible intensité. D'autre part, il faut en déterminer l'origine : la position de la source sur la sphère céleste, ses dimensions, sa forme, etc., ce qui nécessite un pouvoir séparateur très bon.

C'est dans ces deux domaines, détection des faibles bruits et amélioration du pouvoir séparateur, que les radioastronomes ont le plus travaillé.

4.1. La détection des faibles bruits

Les « densités de flux » les plus faibles que nous puissions actuellement détecter sont de l'ordre de 10^{-28} $W.m^{-2}Hz^{-1}$

Le seuil de détection d'un radiomètre étant donné par la formule :

$$\Delta T = K \frac{T_{rec}}{\sqrt{B\tau}},$$

dans laquelle ΔT est la plus petite augmentation de bruit détectable, exprimée en degré Kelvin, T_{rec} la température de bruit du récepteur, B et τ la bande passante et la constante d'intégration utilisées. Le choix de B et de τ est imposé par les caractéristiques spectrales et les variations temporelles de la source. C'est donc en diminuant T_{rec} que la sensibilité pourra être améliorée. Les radioastronomes ont donc été parmi les premiers à être intéressés par les récepteurs à faible bruit, amplificateurs paramétriques et masers, et ont fortement contribué à les développer.

Avec les récepteurs à faible bruit, il devint nécessaire de tenir compte des bruits provenant de toute source autre que l'astre étudié, fond du ciel, bruit thermique de l'atmosphère, bruit du sol, dont l'ensemble constitue la « température de système » du radiotélescope. D'où le développement des « antennes froides » c'est-à-dire des antennes qui, pointées vers le ciel, ont une température de système minimale. L'étude des lobes secondaires peut diminuer très sensiblement la contribution du sol. Le rayonnement du fond du ciel (ou de la galaxie) est négligeable sur microondes, par contre il devient très intense sur ondes longues métriques et surtout décamétriques, ce qui rend inutile, dans cette gamme, l'utilisation de récepteurs à faible bruit.

4.2. Le pouvoir séparateur

Dans de bonnes conditions d'observation, les instruments optiques permettent d'obtenir une résolution de 0,1″, soit $0{,}5\ 10^{-6}$ rad.

Pour un radiotélescope de dimension D et une antenne, en général, travaillant sur une longueur d'onde λ, la résolution (ou pouvoir séparateur) est égale à la largeur du lobe d'antenne, soit $\theta_{rad} = \lambda/D$.

Pour obtenir un résultat comparable à celui des télescopes optiques, il faudrait donc des instruments de plusieurs millions de longueurs d'onde, ce qui est impossible à réaliser. Autrement dit, le mauvais pouvoir séparateur des radiotélescopes constitue le

plus sérieux handicap pour les observations radio et un effort considérable a été fait, depuis 1945, pour l'améliorer par tous les moyens possibles. C'est certainement dans ce domaine que l'apport de la radioastronomie a été le plus important.

Trois grandes directions ont été suivies : instruments de surface continue de plus en plus grande, interféromètres classiques et synthèse d'ouverture et enfin interféromètres à très grande base.

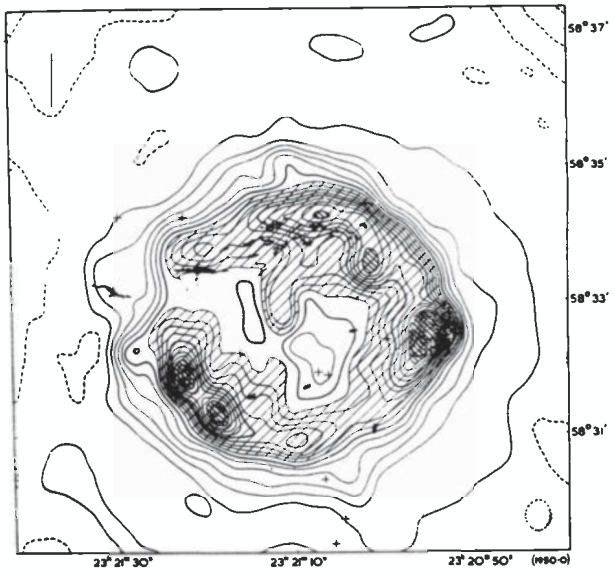


FIG. 5. — Structure de la radiosource Cassiopée A, obtenue par synthèse d'ouverture sur 408 MHz. Pouvoir séparateur : 30".

Les premiers types d'instruments ont conduit aux radiotélescopes géants qui existent actuellement dans de nombreux pays. Par exemple, le radiotélescope de Nançay a une surface de 7 000 m² et fournit un pouvoir séparateur de 1'5 sur 6 cm de longueur d'onde. Le réflecteur sphérique d'Arecibo, Porto Rico, avec une ouverture de 300 m de diamètre, d'où une surface de 75 000 m² peut actuellement être utilisé jusqu'à 50 cm, avec un lobe de 6'. A Bonn, en Allemagne, un grand réflecteur parabolique de 100 m de diamètre vient d'être achevé. Il donnera, sur 3 cm, un lobe d'environ 1'.

Il est évident que la construction de tels instruments pose plus de problèmes mécaniques que radioélectriques.

Il n'en est pas de même des interféromètres, qui ont été développés dès 1945 par les radioastronomes pour obtenir, avec de petites antennes, des résolutions spectrales convenables. L'inconvénient de ces interféromètres est qu'ils fournissent simultanément plusieurs lobes dans différentes directions.

Le plus simple des interféromètres est l'interféromètre à deux antennes, qui fut utilisé dès le début de la radioastronomie. Vers 1950, CHRISTIANSEN, en Australie, conçut l'interféromètre à réseau, qui utilise un certain nombre d'antennes alignées dans une même direction. On obtient ainsi un bon pouvoir séparateur, mais dans cette seule direction. Il faut alors le coupler avec un réseau identique perpendiculaire pour obtenir une bonne définition dans toutes les directions. Plusieurs de ces instruments sont installés à Nançay, pour les observations solaires, en particulier un réseau à 32 antennes sur une base EW et 8 sur une base NS.

Une variante intéressante a été construite en 1968 par J.P. WILD en Australie. Un lobe quasi circulaire est obtenu en utilisant un réseau circulaire composé de 96 antennes de 13 m d'ouverture, disposé régulièrement sur un cercle de 3 km de diamètre. Sur 80 MHz, cet instrument a un lobe de 3' × 3' et fournit des images complètes du soleil, sur deux polarisations, toutes les secondes.

La synthèse d'ouverture, ou antenne synthétique, a été mise au point par l'Anglais M. RYLE, à Cambridge. En observant successivement une région du ciel avec un interféromètre dont les deux antennes occupent successivement toutes les positions possibles dans une surface A, et en combinant convenablement les signaux obtenus, on obtient l'équivalent d'une antenne unique de surface A. On peut donc, avec deux antennes de dimensions modestes, « synthétiser » un instrument de très grande dimension. Mais cela nécessite de longues observations, surtout si l'on désire un bon pouvoir séparateur dans toutes les directions. Dans le procédé de supersynthèse, élaboré également par M. RYLE, on utilise en outre le déplacement de la source par rapport aux antennes par suite du mouvement diurne. A cause de ce mouvement, l'orientation de la base d'un interféromètre à deux antennes, repérée par rapport à la direction de l'astre observé, change au cours de la journée, ce qui est équivalent à une rotation de la base par rapport à une direction fixe. Il suffit alors de déplacer les antennes l'une par rapport à l'autre dans une seule direction.

La supersynthèse est maintenant employée dans plusieurs grands instruments, comme celui de Greenbank aux USA, Cambridge et Westerbrock en Hollande (11 antennes de 25 m pouvant travailler jusqu'à 10 cm).

Quand la distance entre deux antennes augmente, il est de plus en plus difficile de les utiliser en interféromètre classique. Si les deux antennes sont reliées par des lignes de transmission, les pertes dans ces lignes deviennent importantes, avec génération de bruit et variation de la phase relative. On peut alors utiliser un faisceau hertzien pour transmettre les signaux d'une antenne à l'autre, mais cette technique est limitée à quelques centaines de kilomètres.

Pour aller plus loin, les radioastronomes ont mis au point les « interféromètres à très grande base » (VLBI) dans lesquels les signaux sont enregistrés indépendamment par deux antennes. Pour obtenir des franges d'interférence, il faut alors ajouter ces signaux, en tenant compte de leur phase relative. Celle-ci est connue en enregistrant à chaque extrémité des signaux provenant de deux oscillateurs à très grande stabilité (horloge à caesium ou à rubidium). La cohérence des oscillateurs est suffisante pour permettre de synchroniser les deux signaux et de les additionner pour obtenir des franges d'interférence.

Avec cette technique, la longueur de la base n'est évidemment limitée que par le diamètre de la terre, soit 12 000 km. Des interférences ont été obtenues

entre la Californie et l'Australie, la Suède et Porto Rico, la Russie et la côte Est des USA, etc. On peut alors obtenir des bases atteignant des dizaines de millions de longueurs d'ondes, d'où un pouvoir séparateur de l'ordre du millième de seconde d'arc.

Il faut cependant remarquer que cette technique ne permet pas de faire une image de l'astre étudié avec une telle définition. Elle nous renseigne seulement sur la dimension de la source de l'émission radio, ou l'existence de structures de petites dimensions dans une source étendue.

De ce point de vue, la radioastronomie obtient alors des résultats meilleurs que l'astronomie optique qui est limitée par la scintillation atmosphérique.

La technique précédente dépasse beaucoup son application à la radioastronomie. Elle peut être utilisée pour la détermination précise de la position des astres si la base terrestre est parfaitement déterminée ou, inversement, à des recherches de géodésie si l'on utilise une source dont la direction est connue avec suffisamment de précision.

5. La radioastronomie et les techniques spatiales

Les techniques spatiales, développées depuis le lancement du premier spoutnik en 1957 ont eu une influence considérable sur le développement de l'astronomie.

Un de leur intérêt est de permettre l'exploration directe des astres proches, Lune et planètes. Un autre, encore plus important, est de permettre la réception de toutes les ondes et particules émises par les astres mais qui, ne pouvant se propager dans l'atmosphère terrestre, ne sont pas détectables à la surface de la terre. Ainsi toute une nouvelle branche de l'astronomie, utilisant l'ultraviolet et les rayons X, est en train de se développer.

Les techniques spatiales sont également intéressantes pour la radioastronomie. En effet, les ondes de fréquences inférieures à f_0F_2 fréquence critique de la couche F_2, se réfléchissent vers l'extérieur sur l'ionosphère et ne peuvent être observées qu'au-dessus de celle-ci. A l'aide de satellites artificiels et de sondes spatiales, il est possible de faire des observations sur des fréquences beaucoup plus basses qu'avec des instruments sur terre. En particulier, des émissions solaires ont déjà été détectées jusqu'à 30 kHz.

Il existe cependant une limite à ces observations. Le milieu interplanétaire n'est pas un vide parfait ; il contient, au niveau de l'orbite terrestre, environ un électron par centimètre cube, ce qui correspond à une fréquence critique de 30 kHz. Les ondes de fréquences inférieures ne peuvent s'y propager.

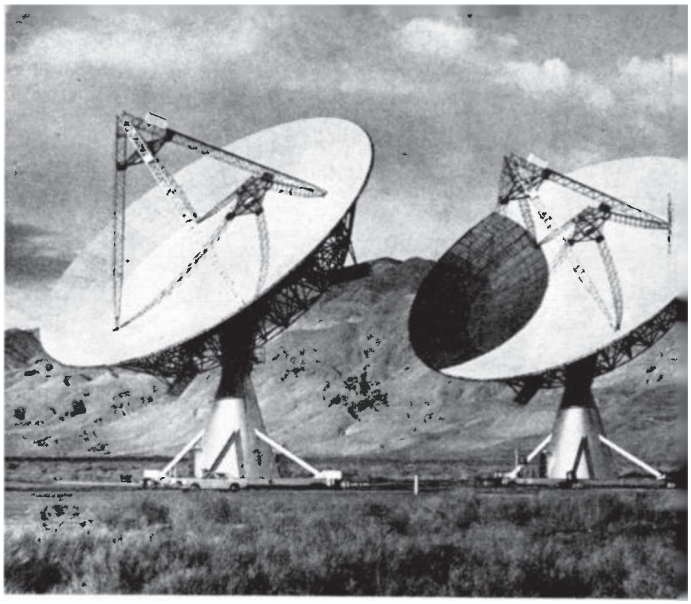


FIG. 6. — Interféromètre à deux antennes mobiles de 30 m de diamètre à Owens-Valley (Californie).

Un autre intérêt de la radioastronomie spatiale est de permettre des observations « en stéréo », c'est-à-dire l'observation simultanée de l'émission des astres proches dans des directions différentes : la terre et une ou plusieurs sondes spatiales. Cela est la seule méthode possible pour déterminer la directivité de cette émission. Des expériences de ce genre sont développées à l'Observatoire de Meudon.

6. Conclusion

En un quart de siècle, la radioastronomie a fait faire des progrès considérables à l'astronomie, soit en découvrant de nouveaux types d'astres, soit en permettant l'étude de phénomènes qui ne peuvent être observés dans le domaine visible. L'astronomie en ultraviolet et en rayons X est, depuis quelques années, en train de provoquer une révolution semblable, mais ce domaine sera toujours handicapé par la complexité de ses instruments : UV et X doivent être observés en dehors de l'atmosphère terrestre, à l'aide de fusées, satellites artificiels ou, peut-être dans le futur, d'observatoires lunaires.

Par contre, les techniques de la radioastronomie sont relativement simples. Les observations se font généralement sur terre, bien qu'il y ait aussi beaucoup à attendre de la radioastronomie spatiale. Un rapport établi par des astronomes américains, optiques et radio, il y a quelques années, envisage le développement de l'astronomie dans les prochaines décennies, et arrive à la conclusion que plus du tiers des moyens (en personnel et en investissement) devrait bientôt être utilisé dans l'étude du spectre radio. Il y a, en effet, encore un travail considérable à faire pour exploiter les découvertes récentes.

Ces vingt dernières années ayant vu au minimum une découverte importante tous les deux ans, on peut encore s'attendre à quelques résultats nouveaux et sensationnels dans les années futures.

M. THUÉ

Ingénieur Général des Télécommunications
Ancien Vice-Président de la SFER

Radiocommunications point à point Faisceaux hertziens et télécommunication par satellite

1. Evolution générale des radiocommunications

Il y a cinquante ans, les télécommunications à grande distance étaient presque exclusivement assurées par des liaisons radioélectriques, et ces radiocommunications fonctionnaient dans les gammes d'ondes kilométriques, hectométriques et décamétriques (fréquences comprises entre 30 kHz et 30 MHz). L'évolution la plus caractéristique du développement des « radiocommunications point à point » (service fixe et services mobiles) est certainement l'emploi de fréquences de plus en plus élevées, à tel point que, de nos jours, la part essentielle du trafic acheminé par voie radioélectrique utilise les gammes d'ondes métriques, décimétriques et centimétriques (fréquences comprises entre 30 MHz et 30 GHz). L'emploi de fréquences plus élevées a été rendu nécessaire par l'augmentation importante du trafic à écouler par voie radioélectrique — et cela malgré la part importante acheminée par les réseaux en câbles souterrains et sous-marins — ce qui a conduit, compte tenu de l'encombrement du spectre des fréquences radioélectriques, à rechercher de nouvelles gammes de fréquences et de plus grandes largeurs de bande. Cette évolution a été rendue possible par les progrès réguliers des techniques radioélectriques, suscités également par les besoins des services de radiorepérage et de radiodiffusion.

Les propriétés du rayonnement et de la propagation des ondes à fréquence élevée imposent deux caractéristiques essentielles des liaisons utilisant ces ondes : d'une part, la possibilité d'utiliser des antennes plus directives, ce qui permet de diminuer d'autant la puissance d'émission, qui ne se mesure plus en kilowatts, mais en watts ou fractions de watts ; d'autre part, la nécessité de limiter, sauf quelques exceptions, la longueur des sections radioélectriques à des trajets en visibilité, l'affaiblissement de propagation augmentant considérablement dès qu'on dépasse l'horizon. Ainsi les liaisons à grande distance doivent-elles être assurées au moyen de bonds d'une cinquantaine de kilomètres chacun, avec un nombre convenable de stations relais ; ces « liaisons à relais radioélectriques » (en anglais « radio relay links », en allemand « Richtfunklinien ») sont couramment désignées en français sous le nom de « faisceaux hertziens ».

Le développement des faisceaux hertziens à partir de 1950 environ a permis de constituer des réseaux de radiocommunication à travers les continents, compétitifs, du point de vue de la qualité et du coût, avec les réseaux établis en câbles souterrains. Le développement plus récent (à partir de 1965) d'un type très particulier de faisceaux hertziens, les « télécommunications par satellite » permet d'établir des réseaux de radiocommunication intercontinentaux compétitifs avec les câbles sous-marins : ainsi l'emploi de fréquences élevées et de satellites artificiels permet-il aux systèmes de radiocommunication de satisfaire les besoins toujours croissants du réseau international de télécommunication.

Toutefois, si l'essentiel de cet exposé doit être consacré à l'implantation progressive des faisceaux hertziens, on ne doit pas négliger l'évolution propre des « liaisons radioélectriques » classiques qui, si elles ont vu diminuer leur importance relative dans l'ensemble des radiocommunications, n'en conservent pas moins leur intérêt spécifique pour certaines applications [1].

Les liaisons à grande distance en ondes décamétriques sont toujours nécessaires pour le service fixe dans le cas où le trafic à écouler est relativement faible et ne justifie pas l'installation d'une station de

télécommunication par satellite (par exemple, liaison avec les îles lointaines et peu peuplées comme Kerguelen, Wallis et Futuna) ou dans les cas de liaisons temporaires à installer rapidement. Les progrès techniques réalisés, tels que l'emploi de la modulation à bande latérale unique [2] avec régulateur de niveau après démodulation pour la téléphonie, l'emploi de la modulation de fréquence avec système détecteur et correcteur d'erreurs en télégraphie et transmission de données, permettent d'obtenir une qualité convenable, sous réserve qu'on puisse utiliser des fréquences pour lesquelles la propagation n'est pas trop perturbée.

Les ondes décamétriques sont également utilisées dans le service mobile aéronautique et maritime : on a proposé récemment l'emploi de satellites pour ces services, mais en attendant la mise en place de systèmes à satellite, peut-être vers la fin de notre décennie, les systèmes à ondes décamétriques sont les seuls à pouvoir assurer des liaisons à grande distance avec les aéronefs et les navires répartis tout autour du globe. Par contre, en ce qui concerne les liaisons à courte distance, en visibilité, des aérodromes ou des ports, les ondes hectométriques, trop encombrées, sont abandonnées au profit des ondes métriques.

Les ondes métriques sont également utilisées pour constituer des réseaux destinés à la navigation fluviale (par exemple la navigation sur le Rhin) et des réseaux de mobiles terrestres [3] tels que liaisons avec les automobiles au voisinage des grandes villes, y compris les réseaux privés des compagnies de taxis, liaisons avec des trains sur les grands itinéraires.

Le service fixe a également recours aux ondes métriques pour assurer des liaisons à courte distance et faible capacité avec des points difficilement accessibles (petites îles proches du continent, refuges de montagne [4] ainsi que pour établir des liaisons de service privées pour certains organismes nationaux : Ministère de l'Intérieur, Gendarmerie nationale, Secrétariat général à l'Aviation civile, SNCF, EDF, compagnies pétrolières, etc. [5, 6].

Cette « montée en fréquence » des liaisons à relativement faible capacité a été motivée par l'encombrement du spectre aux fréquences plus basses ; mais les bandes de fréquences attribuées aux services fixe et mobiles dans la gamme des ondes métriques ne sont pas infiniment larges, et l'encombrement n'a pas tardé à s'y faire sentir également : après saturation de la bande voisine de 40 MHz, il a fallu « monter » successivement à 80 MHz, puis à 160 MHz et à 400 MHz, où la saturation commence à apparaître ; aussi certains réseaux utilisateurs des ondes métriques ou décimétriques supérieures doivent-ils maintenant faire usage de faisceaux hertziens en ondes décimétriques inférieures ou centimétriques.

A l'autre bout du spectre, on peut noter l'usage très particulier des ondes myriamétriques inférieures (fréquences comprises entre 10 et 30 kHz) pour les liaisons avec les sous-marins en plongée, compte tenu de la profondeur de pénétration de ces ondes dans l'eau de mer, ainsi que pour la diffusion des fréquences étalon et des signaux horaires, les conditions de réflexion sur l'ionosphère permettant d'obtenir une meilleure précision qu'en ondes décamétriques.

2. Les faisceaux hertziens en visibilité (*)

Le développement des faisceaux hertziens a été consécutif aux progrès techniques considérables réalisés en ondes décimétriques et centimétriques pour perfectionner les systèmes de radiodétection pendant la seconde guerre mondiale. Cependant, dès 1933, la liaison établie par dessus la Manche entre les aérodromes de Lympne et de Saint-Inglevert [7], qui transmettait une voie téléphonique ou télégraphique en modulation d'amplitude sur une porteuse radioélectrique de longueur d'onde 17 cm, préfigurait modestement les futures liaisons par faisceau hertzien, ainsi que la liaison établie quelques années plus tard, en modulation d'impulsions en position sur une longueur d'onde de 50 cm, entre Saint-Genis-Laval (près de Lyon) et le col de la Faucille.

Les premiers faisceaux hertziens ont été mis en exploitation pour des besoins militaires à la fin de la seconde guerre mondiale ; ils transmettaient huit voies téléphoniques en modulation d'impulsions en durée : d'une part l'équipement n° 10 de l'armée britannique fonctionnant à 5 GHz, lancé en fabrication en 1942 et mis en service en 1944 pour assurer la liaison Bruxelles-Luxembourg [8] ; d'autre part, les systèmes AN/TRC 5 et 6 de l'armée américaine, fonctionnant respectivement à 1,5 et 5 GHz, fabriqués en 1943 et introduits en Europe à la fin de 1944.

Dès 1945, apparaissait aux Etats-Unis la liaison expérimentale à petit nombre de voies New York-Philadelphie [9], puis, en 1947, la liaison à large bande New York-Boston en système TDX [10], qui devait aboutir rapidement à la mise en service à travers tout le territoire des Etats-Unis du système à large bande TD 2, fonctionnant en modulation de fréquence dans la bande des 4 GHz [11] : plus de dix mille kilomètres de faisceau hertzien installés en quelques années et, en particulier, la liaison transcontinentale « coast to coast » New York-San Francisco, comportant 107 sections, mise en service en septembre 1951.

En Europe, des systèmes de faisceau hertzien étaient également étudiés, construits et mis en service peu après la fin de la guerre : dès décembre 1949, était mise en exploitation une liaison à large bande sur des fréquences voisines de 1 GHz entre Londres et Birmingham [12], puis en 1952 une liaison dans la bande des 4 GHz entre Manchester et Kirk o'Shotts (Ecosse) avec des amplificateurs de puissance équipés de tubes à onde progressive [13], qui était la première liaison d'un important réseau de faisceaux hertziens en Grande-Bretagne. A la même période, l'Allemagne se couvrait également d'un réseau de faisceaux hertziens à large bande [14], ainsi que la plupart des pays d'Europe, en particulier la Grèce, où le réseau comporte de nombreux trajets

(*) Un certain nombre de renseignements concernant ce paragraphe ont été tirés du livre de L.-J. Libois « Faisceaux hertziens et systèmes de modulation » (Chiron, Paris, 1958).

maritimes [15]. On doit signaler aussi le cas du Japon, où les faisceaux hertziens ont été développés rapidement et de manière intensive, compte tenu des perturbations apportées dans les réseaux en câble par les fréquents séismes.

En France, après la liaison expérimentale Paris-Montmorency, établie en 1946, qui transmettait douze voies téléphoniques en modulation de fréquence à 1 GHz environ [16], plusieurs faisceaux hertziens en ondes métriques ou décimétriques supérieures ont été mis en service pour répondre à des besoins particuliers, avant le développement des systèmes à large bande en ondes centimétriques : liaison Continent-Corse, d'abord entre Grasse et Calenzana en 1947 [17] puis entre Grasse et La Punta, en 1953, avec prolongement ultérieur vers la Sardaigne et l'Algérie [18] ; liaison Dijon-Strasbourg en 1952 [19] ; liaison de télévision Paris-Lille en 1951 [19], dont les principales caractéristiques sont rappelées dans le tableau I. Le premier système français à grande capacité en ondes centimétriques à trois canaux radioélectriques transmettant chacun une voie de télévision ou 240 à 480 voies téléphoniques, dit système GDH 101 fut expérimenté en 1951 et mis en service en 1953 sur Paris-Lille à l'occasion du couronnement de la Reine Elisabeth II d'Angleterre, puis en 1954 sur les liaisons Paris-Strasbourg et Paris-Lyon-Marseille [19].

En 1953, le Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR), conscient du développement important des liaisons par faisceau hertzien dans le monde entier, adoptait un ensemble de questions et de programmes d'études concernant la normalisation des principales caractéristiques des faisceaux hertziens, en vue de permettre les interconnexions internationales, et les confiait à une commission d'études (n° 9) qui a conservé depuis lors pour mandat les liaisons du « service fixe par faisceaux hertziens ». Un travail intense de normalisation fut alors entrepris, notamment à l'occasion de la réunion intérimaire de la Commission d'études n° 9 à Genève en 1954 [20], et en 1956, l'Assemblée plénière du CCIR recommandait un ensemble de caractéristiques, dont la plupart ont été conservées,

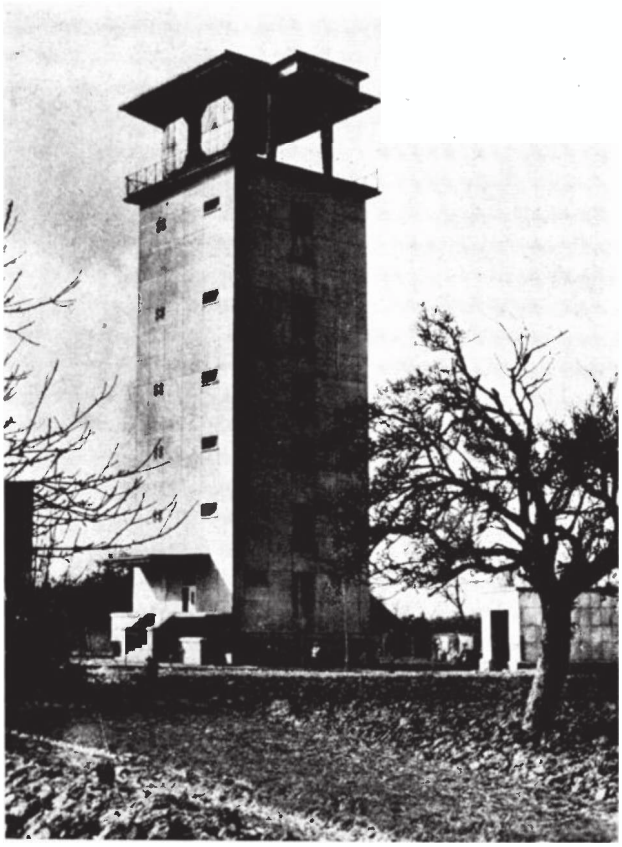


FIG. 1. — Station intermédiaire du faisceau hertzien Paris-Lille, mis en service en 1953.

TABLEAU I

Les premiers faisceaux hertziens français

Date	Liaison	Fréquence	Capacité	Remarques	Référence
1946	Paris-Montmorency	3 GHz	12 voies	expérimentale	[16]
1947	Grasse-Calenzana	100 MHz	12 voies puis 24 voies	trajet maritime : 220 km	[17]
1951	Paris-Lille (3 sections)	1 GHz	1 voie TV		[19]
1952	Dijon-Strasbourg (3 sections)	250 MHz	60 voies		[19]
1953	Grasse-La Punta	50 - 80 MHz	3×24 voies	trajet maritime : 250 km	[18]
1953-1954	Paris-Lille (5 sections) Paris-Strasbourg (10 sections) Paris-Lyon-Marseille (10 sections)	3,5 - 4,0 GHz	3 canaux 1 voie TV +240/480 voies +1 secours	GDH 101	[19]
1956	Paris-Rouen-Caen-Rennes-Nantes (11 sections)	3,8 - 4,2 GHz	5 canaux 1 voie TV 3×300 voies +1 secours 300 voies	GDH 103 ou FH 675	[22]
1957	Marseille-Nice (2 sections) Bourges-Bordeaux (7 sections)	3,8 - 4,2 GHz puis 3,4 - 3,8 GHz	4 canaux 1 voie TV ou 6 voies son	FHT 4003	[22]

et qui ont été ensuite complétées en fonction de l'évolution de la technique : on peut être toutefois surpris de constater que l'essentiel des caractéristiques des faisceaux hertziens actuels figure déjà dans les Avis et Rapports adoptés par le CCIR en 1956 : une des caractéristiques qui avait suscité le plus de discussions entre les pays d'Europe occidentale était le plan de fréquences pour systèmes à 300 ou 600 voies dans la bande des 4 GHz [21].

En 1956 également, l'Administration des PTT mettait en service un nouveau type de faisceau hertzien, dit système GDH 103 ou FH 675/686, conforme aux normalisations du CCIR, qui a constitué la première ossature du réseau de faisceaux hertziens français pour transmission de téléphonie [22]. Ce système, fonctionnant dans la bande 3,8-4,2 GHz, utilise le schéma maintenant classique des « répéteurs à fréquence intermédiaire » (fig. 2).

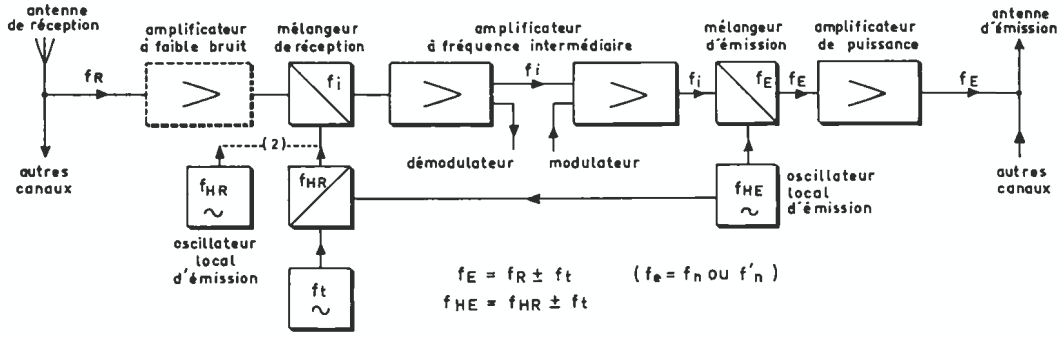


FIG. 2. — Schéma d'un répéteur à fréquence intermédiaire.

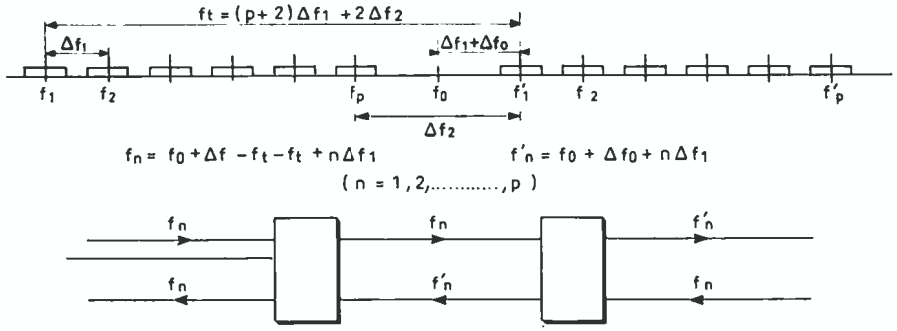
Remarques : 1. — Les faisceaux hertziens n'ont habituellement pas d'amplificateur à faible bruit à l'entrée. Par contre les répéteurs pour satellite utilisant ce schéma (Telstar, Symphonie) en ont un. 2. — L'onde hétérodyne de réception peut être produite soit directement, soit à partir de l'onde hétérodyne d'émission.

Les ondes hyperfréquence sont, au moyen d'une onde hétérodyne produite par un oscillateur local, converties dans le mélangeur de réception en ondes à fréquence intermédiaire (fréquence centrale recommandée : 70 MHz). L'essentiel de l'amplification a lieu en fréquence intermédiaire, avec un point d'interconnexion intermédiaire à basse impédance (1 V crête à crête sur 75 Ω) où sont raccordés en station terminale le modulateur et le démodulateur. Le retour aux hyperfréquences est effectué dans un mélangeur d'émission alimenté par une onde hétérodyne convenable ; le niveau produit par le mélangeur d'émission est généralement insuffisant pour assurer le bilan de puissance nécessaire : on fait alors appel à un amplificateur hyperfréquence qui fournit les quelques watts spécifiés. On pourrait également prévoir symétriquement, à l'entrée, avant le mélangeur de réception, un amplificateur hyperfréquence à faible bruit, mais cela n'est pas nécessaire, le facteur de bruit obtenu avec un mélangeur de réception à l'entrée du récepteur (de l'ordre de 10 à 15 dB, soit une température de bruit de 3 000 à 10 000 K) étant compatible avec le bilan de puissance.

Les faisceaux hertziens à grande distance installés il y a une dizaine d'années avaient des capacités par canal de 300, 600 ou 960 voies téléphoniques ou une voie de télévision ; les voies téléphoniques sont multiplexées en fréquence (système à courants porteurs, utilisé sur les câbles souterrains) et les porteuses radioélectriques modulées en fréquence. Les puissances d'émission sont de quelques watts, les gains d'antennes de 35 à 40 dB, les puissances reçues de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} W. (−60 à −70 dB W). Dans le système GDH 103, comme dans le GDH 101, l'étage de puissance était un tube à onde progressive, pour lequel un effort particulier avait été fait afin d'obtenir une bonne fiabilité (durée de vie de 5 à 10 000 heures), ainsi que pour le tube à modulation de vitesse (klystron), utilisé comme oscillateur local. Par contre, le système FHT 4003 développé par la Radiodiffusion-Télévision française pour ses besoins propres (transmission de voies de télévision et de voies de modulation sonore) utilisait, comme étage de puissance, un amplificateur à triodes hyperfréquences [22] ; ce système, qui fonctionnait initialement dans la gamme 3,8-4,2 GHz, a été transféré dans la gamme 3,4-3,8 GHz, afin d'éviter des brouillages avec le réseau de faisceaux hertziens PTT.

Les faisceaux hertziens utilisent un « plan à deux fréquences », c'est-à-dire que, pour transmettre un canal radioélectrique sur un certain nombre de sections consécutives, on emploie seulement, pour les deux sens de transmission, deux bandes de fréquences, caractérisées par leurs fréquences centrales ; ces deux fréquences sont utilisées pour les deux sens de transmission sur une même section, ou sur deux sections consécutives pour un même sens de transmission (fig. 3). Une gamme de fréquences attribuée aux faisceaux hertziens est généralement divisée en deux sous-gammes : dans chaque sous-gamme peuvent être transmis simultanément un certain nombre de canaux radioélectriques, la deuxième bande de fréquences nécessaire pour la transmission de chacun des canaux étant située dans l'autre sous-gamme. La différence de fréquence entre les deux bandes, fréquence de transposition d'un canal à la traversée d'une station relais, est constante pour un plan de fréquences donné ; d'ailleurs la fréquence hétérodyne de réception est souvent obtenue par mélange entre l'onde hétérodyne d'émission et une onde à la fréquence de transposition, ce qui permet de réduire les dérives de fréquence dues aux oscillateurs locaux, mais offre aux « émissions non essentielles » (fré-

FIG. 3 *a*. — Plan à deux fréquences pour faisceaux hertziens.



Avis CCIR N°	*p*	f_0 MHz	Δf_0 MHz	Δf_1 MHz	Δf_2 MHz	f_t MHz	Capacité (nbre de voies)
283	6	2 203	+10,5	14,0	49,0	119	60 à 300
382	6	4 003,5	+ 5,0	29,0	68,0	213	600 ou 960
383	8	6 175	— 7,41	29,65	44,48	252	1 800
384	8	6 770	—10,0	40,0	60,0	340	2 700
385	20 ou 3*	{ 7 275 / 7 575 }	+ 7,0	7 ou 49*	28 ou 63*	161	60 à 300

* 3 canaux (émission + réception) sur la même antenne : *n*, *m*+8 et *n*+15.

FIG. 3 *b*. — Principaux plans de fréquences du CCIR utilisés en France.

quences images, harmoniques) une boucle de réaction pouvant créer des brouillages internes au système. Sur une artère hertzienne importante, les six ou huit canaux possibles dans une gamme donnée (dont un ou deux sont utilisés à titre de secours des autres, avec commutation automatique en fréquence intermédiaire ou en bande de base), soit au total douze ou seize canaux pour les deux sens de transmission, sont transmis au moyen d'une même antenne à large bande, au moyen de systèmes d'aiguillage en fréquence, et en utilisant deux polarisations orthogonales.

Ainsi, introduits initialement pour assurer des liaisons impossibles à réaliser en câble (traversée d'un bras de mer, régions très montagneuses), les faisceaux hertziens se sont imposés depuis une quinzaine d'années comme un élément essentiel de la constitution des réseaux de télécommunication continentaux, au même titre que les câbles souterrains, en particulier câbles coaxiaux. Les perfectionnements techniques dont ils ont bénéficié, après l'expérience de fabrication et d'exploitation des premiers systèmes, leur ont permis de devenir tout à fait compétitifs avec les systèmes en câbles, à la fois du point de vue de la qualité, y compris la fiabilité, et de celui du coût, incluant le premier investissement et les frais d'exploitation. La commutation sur canal de secours permet de se prémunir contre une défaillance éventuelle d'un matériel, et de réduire les augmentations de bruit dues aux évanouissements de propagation, de façon à satisfaire largement les recommandations du CCIR. Par ailleurs, la télésurveillance, par le faisceau hertzien lui-même, de cinq à dix stations-relais intermédiaires, par une seule station pourvue de personnel, a permis de réduire considérablement les coûts de fonctionnement. D'une façon générale, on peut dire que le faisceau hertzien s'impose dans les régions à relief accidenté, dans les régions où les centres de population sont éloignés, et dans les cas où l'installation d'une liaison doit être faite rapidement. Il est employé concurremment avec le câble dans les régions de plaine et dans les régions à très forte densité de population, où les câbles locaux sont, de toute façon, nécessaires. Les liaïsons par faisceau hertzien constituent approximativement la moitié des liaisons à grande distance dans les pays développés, la proportion étant souvent nettement supérieure à 50 % dans les pays en voie de développement.

Depuis une dizaine d'années, la technique des faisceaux hertziens en visibilité s'est quelque peu stabilisée, mais a bénéficié cependant d'améliorations plus ou moins importantes. Une des plus significatives a été la « transistorisation » des étages à faible puissance qui a permis de réduire la consommation et de simplifier la maintenance. En utilisant des diodes de type varactor comme multiplicateur pour obtenir l'hétérodyne d'émission, et comme mélangeur d'émission, on obtient à la sortie de ce dernier une puissance qui peut atteindre un demi-watt, ce qui est suffisant comme puissance d'émission pour des capacités de 300, 600 et même 960 voies (TFH 665/4), compte tenu de l'amélioration des mélangeurs de réception dont le facteur de bruit est maintenant inférieur à 10 dB [23]. L'amélioration concerne également la qualité de transmission dans la bande passante radioélectrique, en particulier en ce qui concerne la distorsion linéaire d'amplitude et de temps de propagation de groupe (en anglais « group delay », en allemand « Laufzeit ») qui donne, après démodulation, de la distorsion non linéaire donc, dans le cas d'un multiplex, de l'intermodulation. En télévision, cette amélioration permet de transmettre au moyen de sous-porteuses, en plus de la voie de luminance, la voie de chrominance, très sensible aux distorsions d'amplitude et de phase, ainsi qu'une ou plusieurs voies de modulation sonore. En téléphonie, on a pu mettre au point des équipements à 1 800 voies, fonctionnant dans la bande 5,9-6,4 GHz, qui équipent déjà les liaisons Paris-Bordeaux et Lyon-Marseille-Nice. De même, on a lancé l'étude et la réalisation d'un système à 2 700 voies, fonctionnant dans la bande 6,4-7,1 GHz, qui devrait être installé sur la liaison Paris-Lyon vers 1975 [24]. Bien entendu, le système à 1 800 voies

et le système à 2 700 voies utilisent des tubes à onde progressive, compte tenu de la puissance d'émission nécessaire : la dernière étape de la transistorisation pourra être accomplie lorsqu'on saura fabriquer des transistors fiables produisant plusieurs watts à plusieurs gigahertz, ce qu'on commence à savoir faire dans certains laboratoires.

Par ailleurs, le coût des systèmes de faisceau hertzien ayant diminué sensiblement, on emploie ceux-ci depuis quelques années de façon intensive pour assurer des liaisons locales de faible capacité (24 à 120 voies téléphoniques) dans les bandes de fréquence 2,1-2,3 GHz et 7,1-7,7 GHz. Un tel emploi des faisceaux hertziens pour les liaisons locales ne peut être trop généralisé et doit être soumis à une planification rigoureuse, compte tenu des nombreuses possibilités de brouillage. C'est sur ces liaisons locales qu'on voit apparaître, depuis peu, des signaux d'un type nouveau qui vont peut-être ultérieurement se répandre dans l'ensemble du réseau : les multiplex numériques à répartition dans le temps utilisant la modulation par impulsion et codage (MIC). On peut utiliser pour des transmissions numériques des systèmes de faisceau hertzien prévus pour des transmissions analogiques, mais il est préférable d'adapter les équipements hertziens aux particularités de la MIC, pour profiter de tous les avantages de celle-ci : par exemple, les équipements FHD 22 et FHD 28 qui fonctionnent dans la bande 2,1-2,3 GHz, utilisent une modulation de phase à deux ou quatre états, avec régénération des signaux dans tous les relais, et transmettent respectivement 30 ou 120 voies téléphoniques [25]. Les techniques numériques pourront d'ailleurs être prochainement utilisées pour des liaisons régionales, compte tenu de la mise au point d'un équipement à 540 voies téléphoniques en MIC, avec modulation de phase à quatre états, pour fonctionner avec le système FH 664 dans la gamme des 7 GHz.

Pour utiliser la MIC sur des liaisons hertziennes à grande distance et à grande capacité, il serait souhaitable de disposer d'une nouvelle bande de fréquences suffisamment large, qui pourrait être la bande 10,7-11,7 GHz ; de même l'extension des liaisons de télévision à grande distance doit se faire dans la bande 8,0-8,5 GHz ; d'une façon générale, on est conduit à rechercher des bandes de fréquences plus élevées dans le spectre, mais on est limité par les perturbations de propagation introduites par l'atmosphère aux fréquences supérieures à 12 GHz, en particulier par l'absorption due aux gaz de l'air et aux hydrométéores. Il en résulte qu'à ces fréquences, les sections hertziennes devront être de courte longueur ; en transmission analogique, on ne pourra donc les utiliser que pour des liaisons à faible distance, c'est-à-dire des liaisons locales ; par contre, en transmission numérique, où la qualité n'est pas affectée par l'augmentation du nombre de relais, les liaisons à grande distance et grande capacité seront possibles si l'on peut mettre au point des répéteurs-régénérateurs économiques [24].

Une solution permettant de s'affranchir des limitations imposées par le spectre des fréquences est constituée par l'utilisation des guides d'ondes circulaires en ondes millimétriques : il s'agit d'une solution mixte utilisant les techniques radioélectriques sur des supports métalliques. La capacité d'un tel système (de l'ordre de 100 000 voies téléphoniques) lui permettra d'écouler le trafic sur les plus grosses artères au moment où, sur ces artères, toutes les bandes de fréquences disponibles seront utilisées et saturées.

3. Faisceaux hertziens transhorizon (*)

Avant que les réseaux de faisceaux hertziens en visibilité soient développés, était déjà apparue la possibilité des liaisons par faisceau hertzien au-delà de l'horizon [26]. Les phénomènes de propagation concernés et les expériences qui les ont mis en évidence sont décrits par ailleurs [27]. Les premiers matériels ont été construits et installés à partir de 1953 par les Américains dans le Grand Nord canadien et le Groenland [28] ; des matériels français ont été installés en Algérie à partir de 1957 [22]. Toutefois, le développement des faisceaux hertziens transhorizon est complémentaire, et non concurrent, de celui des faisceaux hertziens en visibilité : en effet, si les conditions de propagation sont telles qu'il est possible de faire fonctionner des liaisons sur des longueurs de quelques centaines de kilomètres, l'affaiblissement de propagation correspondant est supérieur d'une centaine de décibels à celui habituellement rencontré dans les liaisons en visibilité ; par ailleurs, les fluctuations de cet affaiblissement sont également de nature différente ; il en résulte que les équipements pour faisceau hertzien transhorizon ont des caractéristiques très différentes de celles des équipements classiques.

Les principales différences de caractéristiques permettant de faire face aux conditons de propagation sont les suivantes :

— les antennes sont de très grandes dimensions, le gain isotrope correspondant est généralement compris entre 40 et 50 dB, les dimensions étant souvent limitées par des causes physiques imposées par l'environnement de l'antenne (vent, intempéries, neige et glace) ; on obtient ainsi un gain d'environ 10 dB par antenne par rapport aux faisceaux hertziens en visibilité ;

— la puissance d'émission est habituellement de plusieurs kilowatts, d'où un gain de 30 dB ; les problèmes de linéarité dans l'amplificateur de puissance font que l'on utilise couramment la modulation de fréquence, et qu'il est très difficile d'employer la modulation d'amplitude à bande latérale unique, pourtant la plus économique du point de vue de la largeur de bande radioélectrique ;

— la température de bruit à la réception peut être abaissée à environ 600 K par l'emploi d'amplificateurs paramétriques (gain de 10 dB environ) ;

— la marge entre le niveau nominal de réception et le seuil de réception peut être réduit à 5 dB

(*) Un certain nombre de renseignements concernant ce paragraphe ont été tirés du livre de F. Du Castel « Propagation troposphérique et faisceaux hertziens transhorizon » (Chiron, Paris, 1961).

FIG. 4. — Station intermédiaire du faisceau hertzien Paris-Bordeaux mis en service en 1970.

environ (d'où un gain de 30 à 35 dB) par l'utilisation de la réception multiple, ou réception en diversité ; cela est rendu nécessaire par les fluctuations permanentes de l'amplitude des ondes reçues, compte tenu du mode de propagation, mais cela permet de réduire considérablement la profondeur des évanouissements résiduels, et de diminuer la marge en conséquence. La diversité d'ordre deux n'est souvent pas suffisante, et l'on a recours à la diversité d'ordre quatre en espace, combinée à une diversité d'ordre deux en fréquence, ce qui permet de n'utiliser que deux antennes à chaque extrémité d'une section (fig. 5) ; on doit bien noter que la réception en diversité ne permet de s'affranchir que des fluctuations instantanées, et que l'on doit tenir compte des variations diurnes et saisonnières de l'affaiblissement de propagation, le niveau nominal de réception qui détermine le seuil devant correspondre à la période la plus défavorable ;

— enfin on peut abaisser le niveau du seuil de réception de 5 dB environ en utilisant, pour le démodulateur, des techniques d'amélioration du seuil telles que la compression de fréquence.

Au total, c'est ainsi une centaine de décibels supplémentaires dont on dispose pour faire face à une augmentation de l'affaiblissement de propagation, mais la plupart de ces améliorations sont coûteuses, de telle sorte qu'une section de faisceau hertzien transhorizon permettant de franchir une distance de 200 à 300 km est souvent nettement plus chère qu'une liaison à plusieurs sections de faisceau hertzien en visibilité. On aura donc recours au faisceau hertzien transhorizon pour franchir soit un bras de mer, soit une région peu hospitalière, telle que forêt dense ou désert, où l'implantation et la maintenance de stations relais serait très difficile et très coûteuse.

C'est ainsi que des liaisons transhorizon pour transmission de télévision ont été installées en 1957 entre la Floride et Cuba [29] et en 1960 entre le Roussillon et l'Algérie, avec un relais dans l'île de Majorque [30]. Des liaisons transhorizon pour transmission de voies téléphoniques ont été installées dans le Sud algérien vers 1960, pour relier les centres sahariens de production pétrolière aux ports, à travers des régions désertiques [30], ainsi que dans plusieurs pays d'Afrique tropicale (Côte d'Ivoire, Cameroun, Gabon par exemple) et à Madagascar, à travers la forêt vierge. En métropole, la seule liaison civile a été installée entre le Mont Artzamendi, près de Bayonne et le nord du Portugal. D'autres liaisons, dont les stations relais sont reconnaissables à leurs couples d'antennes de grande dimension, sont utilisées par les militaires : les systèmes transhorizon permettent en effet d'établir directement des liaisons entre bases éloignées, en évitant de construire et de défendre des relais intermédiaires, ou en réduisant considérablement le nombre des relais entre bases très éloignées. Certains faisceaux hertziens transhorizon fonctionnent vers 160 MHz ou 450 MHz, dans les régions à faible densité de population et de radiocommunication, mais les bandes de fréquences nor-

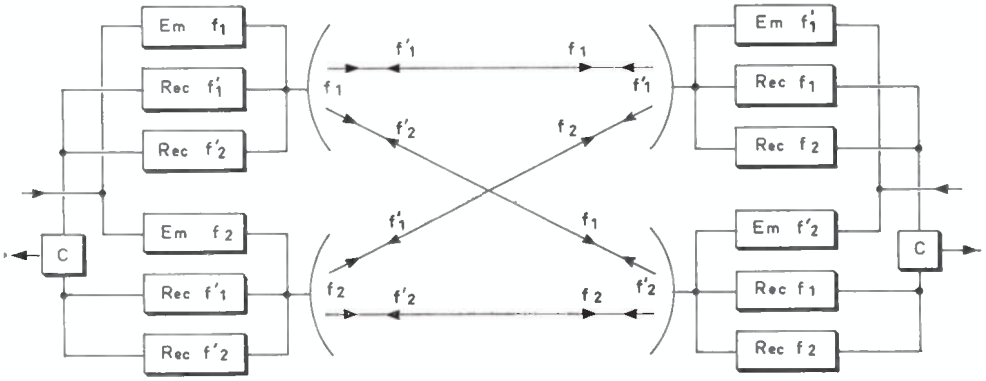


FIG. 5. — Schéma de diversité quadruple (d'espace d'ordre 4 et de fréquence d'ordre 2).
Em : Emetteur - *Rec* : Récepteur - *C* : Combineur.

malement utilisables pour les liaisons transhorizon sont 860-960 MHz ; 2,45-2,7 GHz et 4,4-5,0 GHz.

Compte tenu du développement des télécommunications par satellite, dont on parle ci-après, les faisceaux hertziens transhorizon ne seront vraisemblablement pas utilisés pour la constitution de réseaux à très grande distance ; par contre, pour des liaisons à caractère régional ou national, dans les régions de forêts denses, par exemple pour relier Tananarive aux grandes villes de Madagascar, ils restent le moyen le mieux adapté et le plus économique.

4. Les télécommunications par satellite

Les faisceaux hertziens en visibilité ont permis d'utiliser les techniques radioélectriques pour constituer des réseaux de télécommunication à travers les continents, analogues aux réseaux en câbles et compétitifs avec eux ; les faisceaux hertziens transhorizon permettent, en outre, de franchir des mers avec des bonds de quelques centaines de kilomètres. L'utilisation de satellites artificiels de la Terre permet d'effectuer des bonds de plusieurs milliers de kilomètres et d'assurer des liaisons intercontinentales qui, jusqu'alors, ne pouvaient être établies qu'au moyen de câbles sous-marins à répéteurs immergés ; en outre, les techniques d'accès multiple permettent d'établir avec un seul satellite un réseau comportant un grand nombre de stations dispersées à la surface de la Terre.

Avant le lancement du premier satellite artificiel, en 1955, un ingénieur des Bell Telephone Laboratories, J.R. PIERCE, avait proposé l'utilisation de satellites géostationnaires pour assurer des liaisons à très grande distance [31, 32]. Ce projet mit cependant une dizaine d'années à être réalisé : en effet, si, dès octobre 1957, Spoutnik 1 était lancé autour de la Terre, il fallut attendre plusieurs années pour que soit résolue la mise sur orbite à haute altitude d'une charge ayant une masse assez importante. Cependant les expériences furent entreprises sans tarder : dès la fin de 1958 était lancé sur orbite basse le premier satellite de télécommunication, Score (Signal communication by orbiting relay equipment) ; il est vrai qu'il s'agissait d'un relais à transmission différée, réémettant par télécommande un message reçu et enregistré antérieurement : un tel relais ne peut pas être intégré dans un réseau de télécommunication à transmission instantannée, mais peut être utilisé pour la collecte ou la diffusion de données, ainsi que pour certaines applications militaires ; on octobre 1960 le satellite Courier avait pour but d'expérimenter plus complètement cette technique de retransmission différée, qui assure une grande discrétion des communications, et sans nul doute un certain nombre de satellites militaires à mission secrète ont poursuivi cette expérimentation.

Les premières expériences faites avec des satellites à altitude relativement élevée ont utilisé un satellite réflecteur, Echo 1, ballon plastique métallisé de plus de 30 m de diamètre, lancé en août 1960 par l'Agence américaine pour l'aéronautique et l'espace (NASA), sur une orbite d'altitude moyenne 1 500 km. Plusieurs expériences de télécommunication ont été faites avec Echo 1 ; en particulier en France, dès août 1960, un signal émis aux Etats-Unis était reçu à Issy-les-Moulineaux au moyen d'une antenne de 3 m de diamètre, [33], puis en octobre 1960 à Nançay au moyen d'une antenne de 10 m de diamètre maintenue pointée dans la direction du satellite pendant les quelque cinq minutes de visibilité mutuelle avec les Etats-Unis [34]. Ces expériences ont permis de vérifier les conditions de propagation, notamment à incidence rasante, et la dérive de fréquence due à l'effet Doppler, ainsi que de se familiariser avec les problèmes de la poursuite. Cependant, les véritables expériences de télécommunication ne commencèrent qu'après le lancement de Telstar 1 par la NASA, en juillet 1962. Le satellite, construit par les Bell Telephone Laboratories, comportait un répéteur actif de télécommunication émettant quelques watts, et gravitait sur une orbite elliptique telle que l'apogée était situé au-dessus de l'hémisphère nord à environ 5 Mm d'altitude, ce qui assurait des durées de visibilité mutuelle de l'ordre d'une demi-heure entre l'Europe occidentale et l'Est des Etats-Unis. L'administration des PTT ayant décidé de participer au programme expérimental international, le Centre national d'études des télécommunications avait construit une station expérimentale à Pleumeur-Bodou (Côtes-du-Nord), qui permit d'effectuer des liaisons expérimentales dès le lancement de Telstar 1 [35], puis de les continuer en 1963-64 avec les autres satellites expérimentaux, Relay 1, Telstar 2, Relay 2, dont l'apogée s'est élevé jusqu'à environ 10 Mm, augmentant ainsi la durée de visibilité mutuelle. Un grand pas fut franchi vers les systèmes exploitables lorsqu'on démontra la possibilité de maintenir un satellite en position stationnaire (*) par rapport à la Terre, ce qui fut fait en 1964 avec Syncom 3, qui retransmit les programmes de télévision issus des Jeux Olympiques de Tokyo (Syncom 2 avait antérieurement été maintenu en position géosynchrone, avec une inclinaison de 30° environ).

En 1964, 18 pays formaient à Washington le Consortium international de télécommunication par satellite Intelsat, et en avril 1965 était placé en position géostationnaire le satellite Intelsat 1 (Early Bird), qui était mis en exploitaion expérimentale dès juin 1965 pour transmettre entre les Etats-Unis et l'Europe 240 voies téléphoniques ou une voie de télévision. Une telle liaison intercontinentale par satellite est analogue à un faisceau hertzien en visibilité directe à deux sections, la longueur de chaque section étant voisine de 40 Mm. Les stations terriennes (**) diffèrent quelque peu des stations de

(*) Un satellite géostationnaire est un satellite de la Terre à orbite directe, équatoriale, circulaire, dont la période de révolution est égale à la période de rotation de la Terre (c'est-à-dire géosynchrone) ; son altitude est d'environ 36 Mm.

(**) Par convention, on appelle « stations terriennes » (en anglais « Earth Stations ») les stations situées sur notre planète et qui communiquent avec des engins spatiaux, par opposition aux « stations de Terre » (terrestrial stations) qui assurent des liaisons à la surface de notre planète.

FIG. 6. — Station expérimentale de faisceaux hertzien transhorizon fonctionnant à 900 MHz avec deux antennes de 10 m de diamètre.

faisceau hertzien, les principales différences étant :

— une antenne mobile de grande dimension, pointée en permanence dans la direction d'un satellite au moyen d'un dispositif de poursuite, automatique ou sur programme, et fonctionnant simultanément à l'émission et à la réception, grâce à un dispositif d'aiguillage ;

— à l'émission, un amplificateur produisant une puissance de l'ordre du kilowatt (comme dans le cas des faisceaux hertziens transhorizon), ce qui poserait de difficiles problèmes de linéarité si l'on désirait utiliser la modulation d'amplitude à bande latérale unique ;

— à la réception, un amplificateur à très faible bruit : dans les premières stations expérimentales, on utilisait un amplificateur quantique (maser) et, en réduisant les autres causes de bruit, en particulier en utilisant une antenne à très faible rayonnement latéral et arrière, on obtenait une température globale de bruit à la réception à 4 GHz de 30 K, par beau temps et antenne pointée au zénith ; en exploitation, cette température peut atteindre souvent des valeurs comprise entre 50 et 100 K selon les conditions météorologiques (nuages, brouillard, pluie) ; il est donc suffisant d'utiliser un amplificateur paramétrique, dont le bruit propre est plus élevé, mais qui est plus commode d'emploi et a, en outre, une large bande passante.

— un démodulateur à amélioration du seuil, qui permet de fonctionner avec un niveau de signal supérieur seulement de 5 dB environ au niveau de bruit.

La qualité d'une station terrienne à la réception est exprimée par le facteur de mérite G/T, rapport du gain de l'antenne à la réception G et de la température globale de bruit du récepteur T. Pour obtenir une valeur faible de la température de bruit à la réception, il faut que le bruit externe capté par le lobe principal de l'antenne soit le plus faible possible : ceci impose que la fréquence de la section satellite-Terre soit choisie entre 1 et 5 GHz environ ; dans cette gamme, le bruit cosmique, très élevé aux basses fréquences, et le bruit atmosphérique qui s'accroît aux fréquences plus élevées, sont simultanément faibles, de sorte que la température de bruit résultante est seulement de quelques degrés absolus [36]. Compte tenu de l'encombrement du spectre des fréquences radioélectriques, les bandes de fréquences attribuées aux télécommunications par satellite sont partagées avec les faisceaux hertziens : les bandes actuellement utilisées sont 3,7-4,2 GHz pour le sens satellite-Terre et 5,9-6,4 GHz pour le sens Terre-satellite.

Quant au répéteur embarqué sur satellite, ses fonctions sont identiques à celles d'un répéteur de station intermédiaire de faisceau hertzien et les niveaux de signal sont voisins dans les deux cas. La seule différence importante à noter quant au principe est que le répéteur à fréquence intermédiaire (fig. 2) utilisé sur les faisceaux hertziens, augmenté ici d'un préamplificateur hyperfréquence à faible bruit, est supplanté par le répéteur à amplification directe en hyperfréquence (fig. 7) utilisant des amplificateurs à diode tunnel et des tubes à onde progressive.

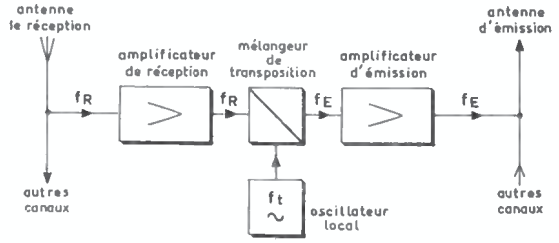


FIG. 7. — Schéma d'un répéteur d'amplification directe.

D'autre part, le répéteur embarqué pose des problèmes particuliers de technologie et de fiabilité. Les principales contraintes de la technologie spatiale sont :

— la réduction de l'encombrement et de la masse des équipements embarqués, par l'emploi de tech-

niques de microcircuits en hyperfréquence, l'utilisation d'alliages légers, la réalisation de filtres à couplage direct à encombrement très réduit, etc. ;

— la réduction de la consommation des éléments actifs : par exemple on a mis au point des tubes à onde progressive à rendement nettement amélioré, fonctionnant avec une tension de collecteur réduite ;

— la résistance aux vibrations et aux accélérations obtenue par l'emploi de méthodes adéquates de fabrication et d'assemblage des composants.

Enfin la recherche d'une bonne fiabilité nécessite qu'on prenne des précautions particulières pour la fabrication et la sélection des composants, surtout s'il s'agit de composants spécialement développés pour les applications spatiales, ainsi que pour l'optimalisation des schémas utilisés, qui doivent réaliser un compromis entre la plus grande simplicité et une quantité raisonnable de redondance.

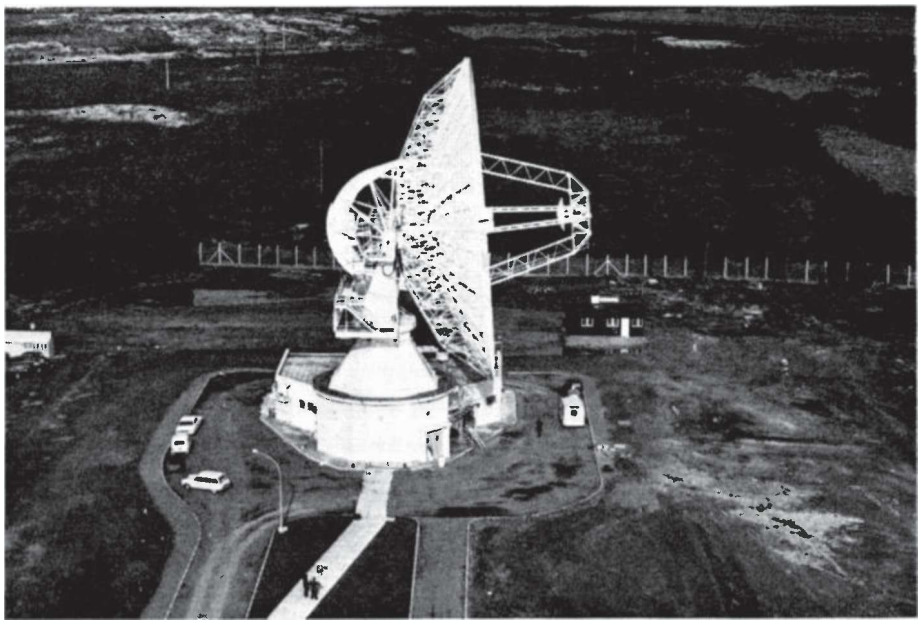


FIG. 8. — Station terrienne de Pleumeur-Bodou 2 pour télécommunications par satellite, équipée d'une antenne de 28 m de diamètre.

L'antenne embarquée pose également un problème particulier : jusqu'à présent, les satellites sont stabilisés en orientation par rotation autour d'un axe ; les premiers satellites expérimentaux avaient des antennes à diagrammes de révolution autour de cet axe, pointé dans une direction perpendiculaire à celle de la Terre. Pour maintenir une antenne directive pointée dans la direction de la Terre, il faut lui communiquer un mouvement de contre-rotation par rapport à celui du satellite. Cette technique permet l'emploi d'antennes directives embarquées qui illuminent la zone de la Terre vue du satellite, ou même, si la directivité est suffisante, une partie seulement de cette zone.

Le fait que l'antenne d'un satellite couvre une zone étendue à la surface de la Terre a permis d'utiliser les satellites Intelsat 3, lancés en 1969, avec un nouveau mode d'exploitation, l'accès multiple : le répéteur du satellite n'amplifie pas seulement les deux porteuses transportant les signaux échangés entre deux stations pour constituer une liaison bilatérale, mais toutes les porteuses émises par dix à quinze stations situées dans la zone de couverture du satellite ; chaque station reçoit l'ensemble des porteuses et, après démodulation, achemine les voies téléphoniques qui lui sont destinées ; c'est l'accès multiple à répartition en fréquence, qui assure dans le réseau international de télécommunication un nouveau type de liaison, impossible à établir de façon simple avec des systèmes sur câble ou sur faisceau hertzien. Pour assurer des liaisons intercontinentales, les satellites sont placés en position géostationnaire au-dessus des trois grands océans, Atlantique, Pacifique et Indien.

Compte tenu du grand nombre de stations réparties autour de l'Atlantique, deux satellites Intelsat 3, d'une capacité maximale de 1 200 voies chacun, ont été mis en place au-dessus de l'Atlantique [37]. Afin de pouvoir communiquer avec un grand nombre de stations de la région atlantique, a été installée à la fin de 1969 une deuxième station à Pleumeur-Bodou [38], équipée d'une antenne parabolique de 27,5 m de diamètre avec une excitation de type Cassegrain. Le premier satellite de la série Intelsat 4 [39] mis en orbite au-dessus de l'Atlantique en janvier 1971, comporte 12 répéteurs ayant chacun une puissance d'émission de 6 W, permettant de transmettre 3 000 voies téléphoniques avec une antenne à couverture totale. Un des canaux doit être utilisé avec une méthode d'accès multiple permettant, voie par voie, l'affectation à la demande, en fonction des besoins, entre les usagers à faible trafic. Une autre forme d'accès multiple, à répartition dans le temps, avec multiplex numérique en MIC, pour les grandes et moyennes capacités, doit également être expérimentée prochainement et peut être généralisée ultérieurement. Par ailleurs, Intelsat 4 comporte aussi la possibilité d'émettre les signaux provenant d'un ou de plusieurs des répéteurs au moyen de l'une des deux antennes à grande directivité (dont le lobe principal a une ouverture de 4,5°, alors que la couverture totale correspond à une ouverture d'environ 17°) et d'obtenir ainsi un flux de puissance nettement plus élevé à la réception à Terre, donc de transmettre une quantité d'information plus grande ; il est envisagé d'orienter les deux « faisceaux étroits » du satellite Intelsat 4 atlantique vers l'Europe occidentale et l'Est de l'Amérique du Nord, de façon à couvrir les stations terriennes au trafic le plus élevé, les autres stations terriennes étant desservies par l'antenne à couverture totale. L'utilisation d'antennes embarquées à faisceaux étroits va certainement se généraliser dans les satellites futurs,

soit pour augmenter la capacité de transmission, comme c'est déjà le cas avec Intelsat 4, soit pour permettre l'emploi de stations terriennes équipées d'antennes de dimensions plus réduites, comme le prévoit le projet franco-allemand Symphonie [40]. Deux autres caractéristiques du satellite expérimental Symphonie, qui seront vraisemblablement conservées dans les futurs satellites, sont la stabilisation complète en orientation, dite « stabilisation sur trois axes », obtenue au moyen d'un volant à inertie, et l'utilisation de panneaux déployables de photopiles, permettant d'augmenter la puissance malgré des dimensions imposées par le type de lanceur employé.

Les études actuellement menées en Europe doivent conduire à la réalisation d'un satellite régional européen de télécommunication [41] dont un modèle expérimental pourrait être mis sur orbite vers 1975, afin de pouvoir commencer une exploitation régulière vers 1978-1980. Un calendrier assez voisin est indiqué par les « Comsat Laboratories » pour la prochaine génération de satellites intercontinentaux que ces laboratoires proposent au consortium Intelsat [42]. Les caractéristiques principales que l'on retrouve dans ces projets sont, outre l'utilisation de faisceaux étroits pouvant permettre la réutilisation des mêmes fréquences dans des faisceaux dont les axes sont suffisamment écartés :

— la montée en fréquences, justifiée par la saturation des bandes utilisées actuellement, et la nécessité d'implanter des stations à proximité des grandes villes, ce qui est pratiquement impossible dans des bandes partagées avec des réseaux très denses de faisceaux hertziens analogiques ; en contrepartie, on doit, bien entendu, augmenter les marges pour faire face aux affaiblissements supplémentaires causés par les « hydrométéores » (et en particulier les orages violents) ; on espère que la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales, réunie à Genève par l'Union internationale des télécommunications en juin-juillet 1971, attribuera aux télécommunications par satellite deux bandes de largeur 500 MHz aux environs de 12 GHz ; ensuite, il faudra utiliser les bandes voisines de 20 GHz, où les effets atmosphériques sont encore plus importants ;

— l'utilisation de multiplex numériques temporels, avec accès multiple à répartition dans le temps dans chaque faisceau étroit et possibilité d'aiguillage de « paquets » de voies à l'intérieur du satellite.

Une préoccupation commune de tous les ingénieurs chargés d'étudier les futurs systèmes est de conduire leurs études de façon à utiliser le plus efficacement possible d'une part l'orbite des satellites géostationnaires, sur laquelle les satellites fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences ne peuvent pas être rapprochés sans risque de brouillage, d'autre part les bandes de fréquences attribuées aux télécommunications par satellite, dont la largeur est limitée, ce qui, malgré les progrès techniques, limite supérieurement la capacité de transmission des systèmes à satellite. On peut cependant espérer qu'il s'écoulera encore un grand nombre d'années avant que le spectre des fréquences et l'orbite géostationnaire soient simultanément saturés et que l'association des satellites artificiels et des ondes radioélectriques, de fréquences toujours plus élevées, fournira pendant longtemps un moyen adéquat pour écouler une part importante du trafic sans cesse croissant du réseau mondial de télécommunication.

Cet exposé sur l'évolution des systèmes de radiocommunication a bénéficié, sous forme de textes ou de discussions, de la collaboration de nombre de mes collègues, et notamment de M. L.J. LIBOIS, Directeur du CNET, et de MM J. BES, P. BLANCHEVILLE, L. BOITHIAS, L. BOURGEAT, D. CHATAIN, F. du CASTEL, J.P. HOUSSIN, F. JOB, M. LIGER, J.P. POITEVIN, J. VERRÉE.

Bibliographie

[1] MONTMANEIX G. — Evolution générale des Services radioélectriques des Postes et Télécommunications de 1944 à 1961. *L'Onde Electrique*, *42*, 419, p. 118, fév. 1962.

[2] DEVAUX J.L. et BYK M. — Les équipements de radiocommunication à bande latérale unique. *L'Onde Electrique*, *36*, 351, p. 520, juin 1956.

[3] RENARD H. et BRULEY M. — Quelques aspects particuliers des réseaux mobiles en ondes métriques. *L'Onde Electrique*, *36*, 349, p. 348, avril 1956.

[4] DUPUIS P. et STROHL J. — Le réseau radiotéléphonique du massif du Mont-Blanc. *L'Onde Electrique*, *38*, 379, p. 703, oct. 1958.

[5] LAURENT P. — Le nouveau service radiotéléphonique mobile maritime utilisé par la SNCF. *L'Onde Electrique*, *40*, 346, p. 332, avril 1960.

[6] DREVON J. — Matériels utilisés par l'EDF pour ses liaisons radiotéléphoniques dans la bande des 80 MHz. *L'Onde Electrique*, *42*, 229, p. 1053, déc. 1962.

[7] CLAVIER A.G. and GALLANT L.C. — Anglo-French micro ray link between Lympne and St Inglevert. *Electrical Communication*, janvier 1934.

[8] ARMY N° 10 SET. — Description du système multiplex parue dans le n° de juin sous le titre Pulse width modulation-description de l'équipement radioélectrique dans le n° de septembre. *Wireless World*, juin et septembre 1946.

[9] THOMSON L.E. — A microwave relay system. *Preceedings of the Institute of Radio Engineers*, décembre 1946.

[10] DURKEE A.L. — A microwave relay system between New York and Boston. *Bell Laboratories Record*, décembre 1947.

[11] ROETKEN A.A., SMITH K.D. and FRIIS R.W. — The TD 2 microwave radio relay system. *The Bell System Technical Journal*, octobre 1951, XXX, 4, part. II.

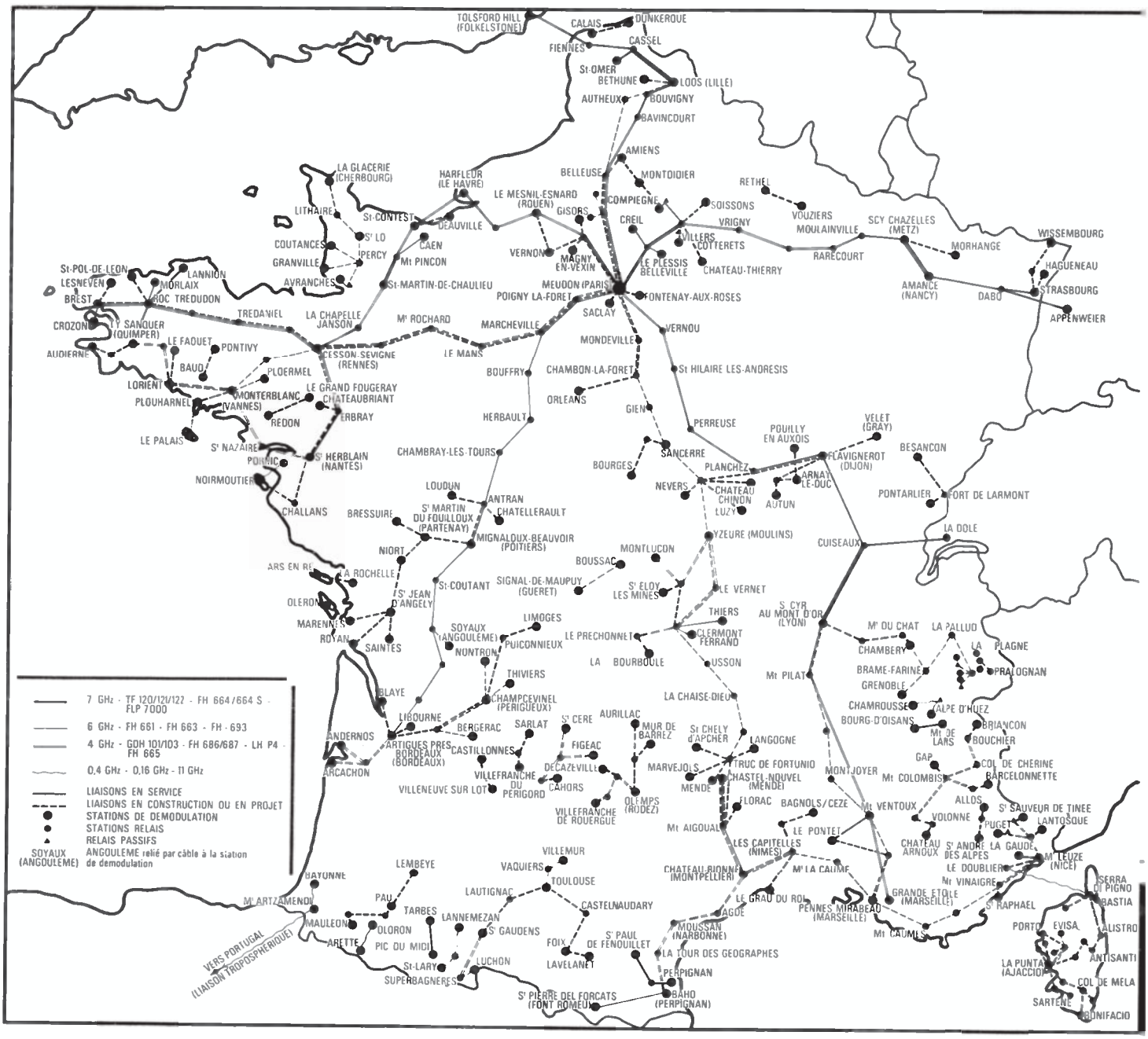
[12] CLAYTON R.J., ESPLEY D.C., GRIFFTH C.W. and PINKHAM J.M. — The London-Birmingham television radio-relay link. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 98, part I, 1951, p. 204.

[13] DAWSON G., HALL L.L., HODGSON K.G., MEERS R.A. and MERRIMAN J.H. — The Manchester-Kirk o'Shotts television radio-relay system. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Part. I, mai 1954.

[14] DIETRICH E. — Neue Fernsch-Richtfunk Vervindungen der deutschen Bundespost. *Fermddetechnische Zeitschrift*, mai-juin 1953.

[15] CABESSA R. — Réalisation de liaisons par faisceaux hertziens de qualité sur des trajets maritimes en Grèce. *L'Onde Electrique*, août-septembre 1955.

[16] CLAVIER A.G. et PHELIZON G. — Le câble hertzien Paris-Montmorency. *L'Onde Electrique*, août-septembre 1946.



Liaisons hertziennes PTT

[17] Rivière P. — La liaison radioélectrique multiplex Continent-Corse. *L'Onde Electrique*, juillet et août-septembre 1948.

[18] *L'Onde Electrique*, *32*, 301 (avril-mai 1952) numéro consacré aux faisceaux hertziens.

[19] Place Y. — Le faisceau hertzien Grasse-La Punta. *Bulletin des Services Radio-électriques des PTT*, mai et juillet 1954.

[20] Libois L.J. — Normalisation internationale des caractéristiques d'interconnexion des systèmes de faisceaux hertziens. *L'Onde Electrique*, *35*, 345, p. 1175, déc. 1955.

[21] Thué M. — Les textes du CCIR concernant les faisceaux hertziens, *Onde Electrique*, *39*, 393, p. 939, déc. 1959.

[22] *L'Onde Electrique*, *37*, 368 (novembre 1957) numéro consacré aux faisceaux hertziens.

[23] Chatain D et Deltort J. — Le faisceau hertzien transistorisé à 960 voies. *L'écho des recherches*, n° 64, p. 4, avril 1971.

[24] Verrée J. — Les faisceaux hertziens : la question des fréquences. Conférence faite à la SFER le 21 avril 1971.

[25] Liger M. — Caractéristiques des faisceaux hertziens numériques. Conférence faite à la SFER le 21 avril 1971.

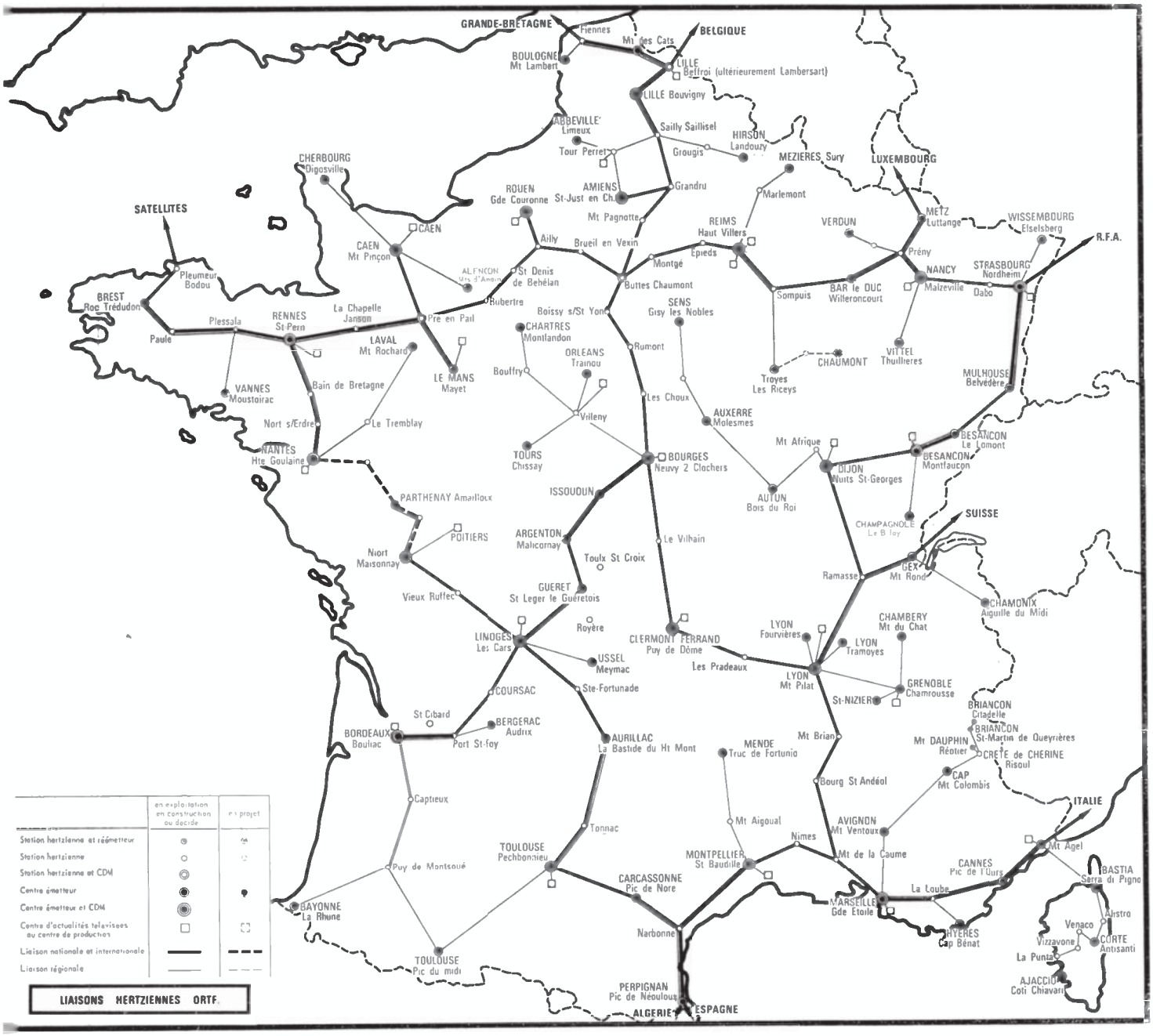
[26] Altman F.J. et Gray R.E. — 900 MC PTM over the horizon radio link. *IRETransactions*, MTT, déc. 1955.

[27] Boithias L. — La propagation des ondes dans les régions non ionisées de l'atmosphère. *L'Onde Electrique*, juillet-août 1971.

[28] Durkee A.L., Metcalfe D. et Tidd W.H. — White Alice system, design and performance. *IRE Transactions*, CS, déc. 1959.

[29] Stiles K.P. — Report on over the horizon radio transmission test between Florida and Cuba. *IRE Conv. Rec. 8*, p. 212, 1956.

[30] *L'Onde Electrique*, *40*, 394 (janv. 1960) numéro consacré aux faisceaux hertziens transhorizon.



Liaisons hertziennes ORTF

[31] PIERCE J.R. — Orbital radio relays. *Jet propulsion*, *25*, p. 153, avril 1955.

[32] PIERCE J.R. et KOMPFNER R. — Transoceanic communication by means of satellites. *PIRE*, *47*, p. 372, mars 1959.

[33] CARRU H., GENDRIN R. et REYSSAT M. — A transatlantic communication experiment via Echo 1 satellite. *Nature*, *189*, 4, 761, janv. 1961.

[34] HOUSSIN J.P. — Réception d'un signal réfléchi par le satellite Echo 1. Etude CNET n° 602 T, mars 1961.

[35] THUÉ M. et HOUSSIN J.P. — Le projet Telstar et la station expérimentale de télécommunication par satellite de Pleumeur-Bodou, *L'Onde Electrique*, *43*, 432, p. 341, mars 1963.

[36] THUÉ M. et VOGE J. — Influence des facteurs de propagation sur la température de bruit d'un récepteur aux hyperfréquences. *L'Onde Electrique*, *47*, 479, p. 294, fév. 1967.

[37] GLOMB W.L. et FEIT L. — Le système Intelsat III. *Revue des télécommunications*, *45*, 4, p. 312, 1970.

[38] *L'Onde Electrique*, *49*, 10, nov. 1969. La seconde station de télécommunication de Pleumeur-Bodou.

[39] Intelsat IV. *Journal des télécommunications*, *38*, IV, p. 189, avril 1971.

[40] Le projet Symphonie : divers articles, en particulier de J.B. DEMENTHON et J. SANY, dans *La Recherche spatiale*, *10*, n^{os} 1 et 2, 1971.

[41] KABITSCH H., MALLEUS G., MYRENFORS G., REED A.G. et RUSPANTINI L. — Etude d'un système possible de satellite de télécommunication régional européen. *L'Onde Electrique*, juin 1971.

[42] WELTI G. — La technique des télécommunications spatiales dans la prochaine décennie. *L'Onde Electrique*, juin 1971.

M. FAVREAU

Adjoint Tech. du Dir. Dép. Télévision Thomson-CSF

R. GENÈVE

Ingénieur en Chef au LEP

L. GOUSSOT

Ingénieur Général à l'ORTF
Vice-Président de la SFER

S. LACHARNAY

Ingénieur en Chef des Télécommunications à l'ORTF

A. LAURENS

Dir. Tech. et Ind. de TRT
Président de la 8e section de la SFER

J. POLONSKY

Directeur Technique Div. Radio. Télé. Thomson-CSF

La radiodiffusion sonore et visuelle

1. Introduction

Les cinquante années qui sont évoquées dans ce numéro spécial de *l'Onde Electrique* contiennent toute l'histoire du développement de la radiodiffusion sonore et visuelle que les études et expériences de laboratoire avaient préparée depuis la fin du siècle dernier.

Cette histoire est cependant si riche en événements que chacune des divisions de cet article justifie un développement ayant l'ampleur d'un article. Les auteurs qui ont contribué à la rédaction de ce texte ont senti ce que la limitation du cadre imposé ici pouvait dégrader la description des événements importants. Ils ont apporté pour la rédaction de ce résumé la matière d'information qu'il serait souhaitable d'insérer en entier dans quelque prochain numéro de *l'Onde Electrique*, puisque ce cinquantenaire constitue l'occasion d'établir de tels bilans.

La radiodiffusion sonore et la télévision sont devenues des phénomènes de masse. Aucun application de l'électronique n'a contribué d'une manière aussi directe, à modifier aussi profondément les rapports du public en général avec le monde dans lequel il vit.

La dynamique de ce développement peut trouver dans les comptes de la redevance de l'ORTF les statistiques significatives. La figure 1 montre ce développement depuis l'institution de la redevance pour les récepteurs de radiodiffusion, le 1er juin 1933 (au taux de 50 F de l'époque), jusqu'à ces dernières années pour lesquelles commence à se manifester la saturation due au nombre des foyers français. En fait la redevance unique par foyer ne permet plus d'apprécier la réalité du développement actuel qui est marqué, pour une bonne part, par la multiplication des récepteurs « transistors » et, plus lentement, par la multiplication des récepteurs de télévision.

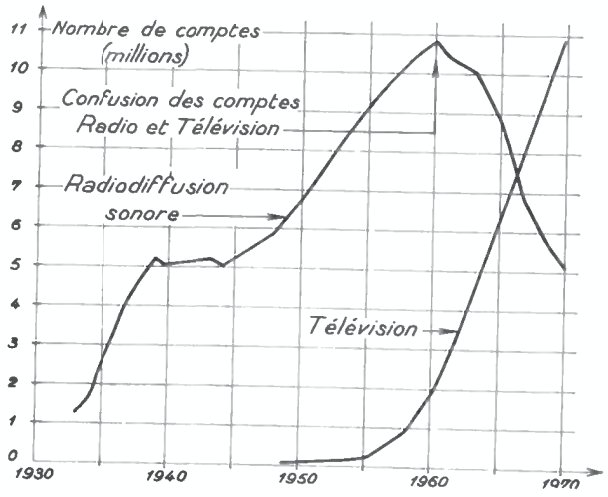


FIG. 1. — Evolution du nombre d'assujettis à la redevance radio et à la redevance télévision.

La radiodiffusion a eu par ailleurs un profond impact sur nos loisirs. En tant que physiciens et informaticiens, ne nous étonnons pas qu'une telle quantité d'informations versées dans nos foyers exerce en contrepartie des contraintes et un conditionnement. Le principe d'équivalence de l'information et de la Négentropie de Brillouin trouve ici un bel exemple d'application.

2. Le développement de la radiodiffusion sonore (1)

2.1. La radiodiffusion et le public

Un premier essai de transmission de la parole par les ondes hertziennes a eu lieu en 1907 entre Berlin et Copenhague avec un émetteur à arc. Un autre essai de transmission de musique (un opéra) aux Etats-Unis en 1910 fut un échec. La première guerre mondiale marque la fin de cette période expérimentale qui commençait, en 1914, à enregistrer des succès.

La radiodiffusion, transmission hertzienne destinée au public, a pris naissance le 13 novembre 1920 aux Etats-Unis, puis en France et en Grande-Bretagne en 1921. A Paris, le Général FERRIÉ anime ce développement et, fin 1921, un émetteur de 1 kW équipé de six tubes, émet régulièrement sur 2 500 m de longueur d'onde. Le public est constitué de quelques professionnels et certains prétendent que cela n'a aucun avenir. ... L'homme de la rue n'éprouve pas encore le besoin d'avoir un « poste ». Il ne se rend pas compte de ce que cela peut être. Mais, peu à peu, dans les pays industrialisés, des stations émettrices rudimentaires s'installent dans les grandes villes.

Le récepteur à galène est, alors, plus utilisé que le récepteur à « lampes » apparu en 1923. Il comporte une plaquette en bois, un mystérieux petit caillou aux facettes brillantes et, sur l'une d'elles s'appuie un petit « ressort », une « bobine », un condensateur et deux fils raccordés au tuyau de gaz et au robinet d'eau. M. LACHARNAY se souvient de son étonnement d'enfant lorsqu'un ami « professionnel » est venu installer un « poste de TSF » à la maison. Après recherche du point convenable sur la galène, on entendait de la musique dans un écouteur collé sur l'oreille. Personne ne lui répondit lorsqu'il demanda pourquoi ça marchait alors que les robinets de gaz et d'eau étaient fermés. Le contact avec les équations de Maxwell et les « guides d'ondes » n'était pas encore établi.

Mais les récepteurs à lampes, avec « batterie d'accus » se multipliaient et, dès 1926, la « radio » s'implantait et la presse publiait les programmes.

L'usage de l'amplificateur, puis l'invention de la « détectrice à réaction », permirent d'augmenter considérablement la sensibilité et d'abandonner le cristal de galène. Le premier semiconducteur prenait ainsi place au musée, en attendant... 1948.

Cette période fut la période rêvée pour l'amateur. Avec des moyens modestes, beaucoup de fils, de vis, on se bricolait un récepteur capable de capter les émissions étrangères, en « ondes courtes », souvent après de longues périodes de tâtonnement et de sifflements stridents. Mais quelle joie d'entendre quelque voix étrangère !

L'invention en 1924 du superhétérodyne, dans laquelle le Français Lucien LEVY joua un rôle de premier plan, et le développement des tubes à grilles multiples introduisent une véritable révolution en rendant le réglage du récepteur accessible à un non-spécialiste. Le poste « secteur », alimenté sur le réseau lumière, apparaît en 1931. C'est, pour l'époque, un grand progrès condamnant l'accu ou la « pile » pour... 20 ans.

Le récepteur classique prend sa forme définitive : superhétérodyne, démodulation par diode, haut-parleur électrodynamique (1925), redressement haute tension par diode, commande unique, contrôle automatique de gain (1929), cadran lumineux avec nom des stations. Les améliorations ultérieures sont : l'œil magique, la contre-réaction améliorant la qualité, le haut-parleur intégré dans le récepteur, l'usage des ondes décamétriques, l'étalement des bandes et le réglage de tonalité.

Par contre, le volume ne diminue guère et il faudra attendre la guerre de 1940 pour voir un progrès spectaculaire sur ce point. Il faut signaler cependant que, dès 1930, des récepteurs radio furent montés sur les automobiles.

L'antenne, elle aussi, évolue. Le fil, au plafond et sur le toit, remplace la conduite d'eau. Le « cadre » rend l'antenne indépendante, son encombrement se réduit. A la veille de 1940 un simple bout de fil pendant derrière le récepteur devient suffisant. A partir de 1950 les antennes à ferrites se généralisent et sont incorporées au récepteur. Les antennes extérieures disparaissent et on ne les retrouvera que lorsque se généralisera la réception de la télévision et de la modulation de fréquence.

C'est vers 1955 que les premiers récepteurs à transistors furent commercialisés. Grâce à la diminution du volume, à l'intégration de l'antenne à ferrite, à la réduction de la consommation, ce qui remet la pile en usage, ils concurrencent rapidement le récepteur à tubes avant de le condamner. Toutes ces qualités, associées à des prix largement diversifiés mais pouvant être très faibles, donnent une nouvelle dimension à la radiodiffusion sonore. Le « transistor » pénètre partout, en se libérant de la nécessité d'un réseau électrique, distrait la bergère gardant ses moutons et anime les révolutions. Quant à la qualité sonore... c'est un autre problème. Cependant, pour l'amateur de la bonne qualité, le support radiodiffusé, parole et musique, reste le plus souvent excellent. Il suffit seulement, pour le récepteur, de l'exploiter. La modulation de fréquence, à laquelle s'ajoute la stéréophonie, est le meilleur support de cette qualité. Elle se reçoit sur des installations dites à « haute fidélité », de plus en plus chères, et dont les utilisateurs, une minorité, sont de plus en plus fiers. Et l'on parle maintenant de tétraphonie !

2.2. L'émission

Pour le public, l'émetteur reste un mystère. Pourtant, l'évolution technologique de l'émetteur a été considérable. Les tubes refroidis par eau entrent en service avant 1930 et les puissances s'accroissent : 80 kW à Radio Paris en 1931 aux Essarts-le-Roy.

(1) Les éléments de ce chapitre ont été rassemblés par M. S. LACHARNAY.

Les centres d'émission s'éloignent des villes et des studios auxquels ils sont reliés par des lignes téléphoniques améliorées, qualité « radiodiffusion ».

A cette époque, on module soit sur la grille, soit sur la plaque, mais en classe A, donc avec un mauvais rendement.

L'encombrement hertzien devient tel que de nouvelles bandes de fréquence et un plan sont nécessaires. Le premier plan européen est fait en 1932 à Lucerne. Il répartit des canaux où figurent des émetteurs de 500 kW en ondes kilométriques (O. km) et de 120 kW en ondes hectométriques (O. hm). Les émissions en ondes décamétriques (O. dam) se développent pour les liaisons internationales.

La période 1933-1940 est celle de l'organisation des réseaux privés et d'Etat. En 1933, le Général FERRIÉ met au point un partage des fréquences entre ces réseaux. De grands centres se développent, dont la technique ne cesse de s'améliorer. CHIREIX met au point, pour l'émetteur d'Allouis, la modulation par déphasage, perfectionnée ensuite en amplitude phase par J. FAGOT. L'introduction des transformateurs de modulation permet la modulation en classe B avec des rendements atteignant 40 à 50 %. En 1940, la France compte 24 émetteurs en O. hm de 10 à 100 kW et un émetteur en O. km de 1 000 kW.

Pendant la seconde guerre mondiale, le seul perfectionnement technique est peut-être le développement, pour des raisons militaires, des réseaux synchronisés. Il s'agissait d'éviter le guidage des avions ennemis. Mais cette époque marque l'importance considérable de la radiodiffusion sur le plan humain.

Après la guerre, le réseau, complètement détruit, est reconstruit et, sur le territoire français, est géré par l'Etat. Parmi les perfectionnements, le plus important est certainement l'invention du « Vapotron » par Ch. BEURTHERET (1951) qui amène la disparition dans le monde entier des tubes à circulation d'eau. Les rendements atteignent 60 %. Les groupes tournants disparaissent et le volume occupé par les émetteurs diminue d'une manière spectaculaire : un émetteur de 100 kW occupe 50 m² en 1952 contre 2 000 m² en 1938.

Les plus récents perfectionnements portent sur la transistorisation des petits étages, l'amélioration du rendement, l'augmentation des puissances possibles, au-delà même de la nécessité, la diminution du nombre des étages de puissance, grâce aux tubes tétrodes de 300 kW à grille en carbone.

Il y a actuellement en France 1 000 kW en O. km, plus de 4 000 kW en O. hm, 2 000 kW en O. dam.

2.3. Les antennes

Les antennes d'émission ont peu évolué dans leur principe. Avant 1940, le pylône en $\lambda/2$ est de règle pour 100 kW en O. hm (où on a renoncé aux capacités terminales). Les losanges en O. dam sont remplacés par des rideaux de doublets et la figure 2 en donne une vue caractéristique. Signalons qu'en France, dès 1951, l'hélicoptère est utilisé pour la mesure des diagrammes de rayonnement. C'est ainsi que furent réglés des rideaux à réflecteurs alimentés et, plus récemment, à Lille, en O. hm, une antenne « à jupe » à diagramme très aplati, donc à gain accru.

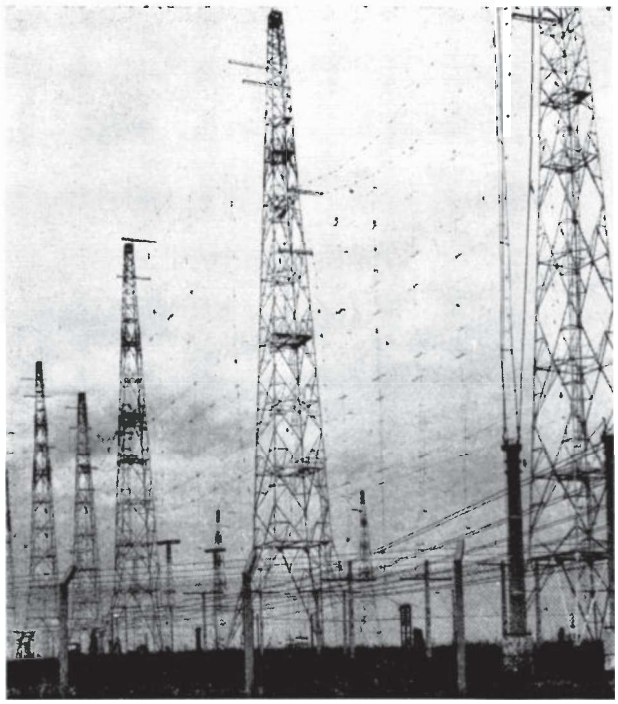


FIG. 2. — Antennes décamétriques du centre ORTF d'Issoudun (hauteur de certains pylônes : 96 m).

2.4. La modulation de fréquence

Les émissions de radiodiffusion en modulation de fréquence (MF) ont commencé en 1938 aux Etats-Unis. Elles n'ont été techniquement rendues possibles, en raison de la saturation des bandes de fréquence classiques, que lorsqu'une bande en ondes métriques a pu être exploitée, c'est-à-dire que l'on a eu la possibilité de fabriquer des kilowatts dans cette bande et des récepteurs à des prix raisonnables. La technique d'emploi des ondes métriques allait de pair avec la télévision et le réseau MF utilisa la même infrastructure que le réseau de télévision. Près de 1 000 kW sont installés en France, avec essentiellement des émetteurs de 10 kW et des antennes à grand gain. Trois programmes sont diffusés (quatre à Paris).

L'ouverture d'une bande métrique pour la radiodiffusion sonore a permis surtout d'augmenter le nombre des programmes. Le type de modulation n'est en fait qu'un aspect secondaire, bien qu'intéressant par l'augmentation de la portée des émetteurs (à peu près doublée), par la meilleure qualité de réception, et par la possibilité de diffusion en stéréophonie avec deux voies son sur la même porteuse.

2.5. Les centres de production

Le développement de l'infrastructure de production des programmes a suivi le développement du réseau de diffusion.

Le studio, après avoir été une pièce quelconque à peine isolée des bruits et dotée d'un traitement acoustique rudimentaire, s'est adapté à sa fonction. Les dimensions s'accroissent avec les participants. Les problèmes de nombre et de position des microphones, suivant le volume du studio, leur traitement et l'effet souhaité, furent assez vite résolus, ainsi que les problèmes de commutation.

La diffusion de musique enregistrée commença très tôt. Très vite apparurent les programmes en différé, qui assuraient la sécurité et la qualité des programmes, évitaient aux artistes d'être au studio à des heures impossibles et permettaient des « montages ». Les disques, gravés directement sur « cire » dès 1930, furent remplacés par les disques en aluminium recouverts de vernis, gravés à 78 tours et dont la qualité était excellente, bien qu'elle se dégradat très vite.

L'enregistrement magnétique, apparu vers 1945 sur fil métallique, est devenu exploitable sur bande magnétique à partir de 1955 et a remplacé la gravure directe sur disque. Cependant, le disque microsillon du commerce est encore utilisé de façon intensive.

Le matériel et la technique de prise de son, de correction, d'effets spéciaux (écho, sonorités variées, etc.) se sont largement développés. Leur qualité s'est améliorée bien que les problèmes de bande passante et de dynamique, associés aux conditions d'écoute et à la qualité des récepteurs, ne soient pas encore entièrement résolus.

La construction de la Maison de l'ORTF marque une date importante dans cette évolution. Cet ensemble complexe associe les studios à un réseau de commutation et de mélange d'une grande souplesse d'exploitation. *L'Onde Electrique* a consacré son numéro spécial de juin 1965 à cette réalisation qui marque la maturité de la technique en matière de prise de son et de composition des programmes.

Les liaisons de ces grands centres de production avec les centres émetteurs se sont aussi améliorées. Les « paires radio » dans les câbles souterrains des PTT sont utilisées depuis 1930. L'introduction des voies hertziennes ne se fait que pour des raisons économiques, notamment pour la liaison avec les émetteurs MF. Sur le plan technique pur, elles ne se justifient que pour la stéréophonie.

2.6. Perspectives

La radiodiffusion sonore, la « radio », s'est implantée dans presque tous les foyers avec souvent plusieurs récepteurs. Il ne semble pas qu'elle sera remplacée par la télévision. Sans doute les heures d'écoute du son seul diminuent et diminueront encore, mais le son garde son avantage fondamental sur la télévision : l'écoute est possible là où l'observation de l'image ne l'est pas ; la conduite automobile, par exemple. Le son peut accompagner toutes les activités et sa réception sera toujours moins chère que celle de la télévision. Le développement du « transistor » montre que le téléspectateur n'abandonne pas son ou ses récepteurs sonores.

Tous les pays cherchent d'ailleurs à augmenter le nombre des programmes son. Les réseaux actuels en modulation de fréquence donnent une très bonne qualité d'écoute et le nombre de récepteurs MF augmentera, sans doute lentement, mais sûrement. La radiodiffusion sonore par satellites est peut-être un moyen d'en étendre les possibilités dans quelques années.

Par contre, le service dans les bandes kilométriques et surtout hectométriques est pollué par la saturation de l'éther, en raison de la propagation indirecte nocturne, et par les parasites industriels qui ne cessent d'augmenter. C'est dans ces gammes qu'existent toutefois les réseaux de base dans la majorité des pays et le nombre et la puissance des émetteurs augmentent sans arrêt, tandis que, paradoxalement en apparence, la surface desservie, dans nos régions notamment, diminue. Aussi parle-t-on d'émissions en BLU qui apporteraient peut-être une solution, mais il reste à construire le récepteur à un prix abordable. Le perfectionnement des antennes d'émission peut aussi permettre une certaine amélioration.

Les émissions décamétriques se développeront certainement. Elles constituent actuellement le seul moyen économique de desservir les grands territoires peu peuplés, et surtout, elles constituent un des principaux liens directs avec les pays éloignés, sur le plan de l'information et de la diffusion de la pensée.

3. Le développement de la télévision [2]

3.1. La naissance de la télévision

En 1920, les grands principes de la télévision sont connus. Le principe du balayage point par point est adopté vers 1880 et NIPKOW en 1884 donne un système pratique de balayage par disque perforé. BELIN l'applique à la transmission des documents.

Cependant, un certain nombre d'éléments pratiques manquent encore. Jusqu'en 1933 le seul détecteur de lumière utilisable est la cellule photoélectrique. Le système de balayage à l'analyse est uniquement mécanique soit par miroirs polygonaux tournants, soit par disque perforé. La lumière reçue par la cellule photoélectrique provient ainsi successivement de chaque point de l'objet. A la réception, la source de lumière est une lampe au néon à faible inertie, modulée par le signal d'image, dont la lumière est mise en place sur l'image visible par l'intermédiaire d'un disque perforé synchronisé sur le disque d'analyse.

[2] Les éléments de ce chapitre ont été rassemblés par M. R. GENÈVE.

FIG. 3. — René Barthélémy dans son laboratoire de la Compagnie des Compteurs.

Ce système, bien que rudimentaire, permet à BAIRD et à JENKINS de faire les premières expériences en 1925. En France, R. BARTHÉLÉMY, dont le nom n'est pas séparable de l'épopée de la télévision, effectue des démonstrations considérées comme remarquables, avec seize images de trente lignes par seconde et en 1931, publie dans *l'Onde Electrique* deux articles sur ce sujet tout nouveau à l'époque. Dans ce système, la limitation des performances est à la fois d'ordre mécanique et d'ordre photométrique, la quantité de lumière utilisée à chaque instant pour former un signal d'image proportionnel étant très faible.

Les événements décisifs pour le développement de la télévision se produisent entre 1930 et 1935.

D'une part le *tube à rayons cathodiques*, connu depuis 1900 environ apparaît comme la solution pour la réception, bien qu'en 1931, R. BARTHÉLÉMY conteste cet intérêt et qu'en 1935 il évoque « l'éventuel développement de cette application ».

D'autre part l'*iconoscope*, décrit en juillet 1933 par ZWORYKIN, dans une conférence à la Société des Radioélectriciens, apporte à l'analyse deux améliorations fondamentales : le balayage par faisceau électronique supprimant la mécanique et son inertie, et d'autre part l'accumulation de l'information lumineuse pendant toute la durée de l'image avec « lecture » très rapide de cette information, ce qui multiplie considérablement la sensibilité. Cet avantage sur des tubes analyseurs contemporains comme le Dissector de Farnworth n'a d'ailleurs été reconnu que difficilement après plusieurs années de discussions.

L'histoire de la radiodiffusion visuelle est étroitement liée au développement des composants essentiels que sont les *analyseurs* et le *tube-image*. Les « *systèmes* »,normes de balayage et de transmission de l'information en sont le complément.

3.2. Les analyseurs

L'*iconoscope* a marqué une époque avec ce système de traduction lumière-courant basé sur le balayage à électrons rapides. Son principal défaut réside dans le fait que les électrons secondaires issus du balayage se redistribuent sans contrôle précis sur la cible et créent des « taches » difficilement corrigeables.

Le balayage à électrons lents supprime ce défaut. Ainsi est créé en 1939, l'*Orthicon* dont la cible reçoit d'un côté l'image lumineuse et de l'autre côté, dans l'axe, le faisceau de balayage. Dès 1945, R. BARTHÉLÉMY réalise en France une version de ce tube, l'isoscope ; en 1947, la Grande-Bretagne présente le CPS Emitron.

En fait, une amélioration importante de ces deux tubes modèles est obtenue par l'adjonction d'une « section image » réalisant un intermédiaire électronique entre la photocathode chargée seulement de la traduction lumière-électrons et la cible qui reçoit le relief de potentiel analysé par le faisceau de balayage. La séparation des fonctions électroniques et la possibilité de former une image lumineuse de l'objet télévisé au format du cinéma apportent les éléments indispensables d'exploitation. C'est ainsi que sont successivement créés le supericonoscope et l'image-Orthicon.

Le *supericonoscope* dérive de l'Iconoscope et se diversifie en plusieurs modèles après 1940. Donnant une analyse d'une grande finesse, il permet dès 1950 l'analyse à 1 000 lignes et justifie, pour une part, le choix d'un système à 819 lignes. Ce tube, en version Photicon, restera en exploitation en France jusque vers 1960, mais sa sensibilité relativement faible, les « taches », qui demeurent son point faible, et la concurrence de l'image-Orthicon le condamnent.

L'*image-Orthicon* est le développement de l'Orthicon. Sa mise au point en 1946 apporte une solution particulièrement heureuse. La construction est difficile et la cible, lame d'un certain verre légèrement conducteur, de 50 μ d'épaisseur, est d'une grande difficulté de fabrication. L'intérêt principal réside dans sa très grande sensibilité permettant la prise de vue dans les conditions normales d'éclairement de la scène et même, dans des situations extrêmes, avec un éclairage de l'ordre de quelques lux seulement, ce qui a permis de dire alors que ce tube était plus sensible que l'œil. Les autres qualités, finesse et bruit de fond, sont juste suffisantes pour les systèmes à 525 ou 625 lignes pour lesquels il a été optimalisé. Ses grandes dimensions et la complexité de son alimentation ne le favorisent guère. Cependant, il remporte un très grand succès pour la prise de vue directe en studio en noir et blanc.

Tous ces analyseurs utilisaient le principe de la photoémission. Vers 1950, RCA présente un tube

basé sur la photoconduction d'une couche sensible sur laquelle se forme l'image lumineuse, tube appelé *Vidicon*. La traduction des photons en charges électriques libres est une propriété des semiconducteurs tels que Sb_2S_3 qui forment souvent cette cible multicristalline. Le relief de potentiel créé par ces charges est analysé à électrons lents par un faisceau de balayage.

Le tube, de dimensions très réduites, est d'une grande simplicité, l'image est dépourvue de taches, mais sa sensibilité, limitée pratiquement par les effets d'inertie donnant un traînage sur les images mobiles, est inférieure à celle de l'image-Orthicon. Son succès est cependant très grand surtout pour la télévision industrielle, mais aussi pour ses applications au télécinéma et aux caméras légères de reportage.

Enfin, un progrès très important est obtenu après plus de dix ans d'étude par Philips avec le développement du *Plumbicon* à couche en oxyde de plomb (PbO). Un effet semiconducteur mieux contrôlé améliore la sensibilité en réduisant le traînage. Ses qualités imposent ce tube pour la caméra en couleur.

La figure 3 permet d'apprécier l'évolution de ces tubes analyseurs.

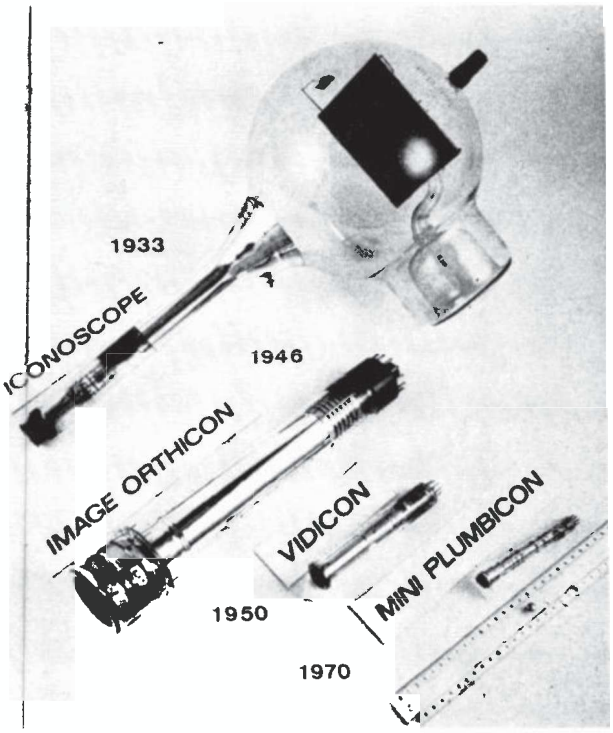


FIG. 4. — Evolution des tubes analyseurs de télévision de 1933 à 1970.

3.3. Les tubes-image

Le tube à rayons cathodiques pour la télévision en noir et blanc a peu évolué dans son principe depuis 1939. Les performances et la technologie de fabrication se sont cependant considérablement améliorées, qu'il s'agisse de la focalisation, du contraste ou de la protection. Les tubes, initialement ronds, deviennent rectangulaires, l'écran bombé devient plat et surtout l'angle de déviation passe de 60 à 110°.

La recherche de projecteurs pour la réception sur grand écran s'est faite dans deux directions :

— utilisation de tubes cathodiques de très grande luminosité associés à un système optique de projection à optique de Schmidt. Dès 1948, R. BARTHÉLÉMY projetait des images de télévision sur écran de cinéma à Montrouge ;

— application du procédé suggéré en 1939 par le Professeur FISHER consistant dans la modulation d'un faisceau lumineux issu d'une lampe à incandescence par la surface d'un film « d'huile » modulée par la charge électronique déposée par un faisceau de balayage. C'est l'Eidophore (1950) permettant des projections très lumineuses mais ayant l'inconvénient d'être d'une exploitation coûteuse.

3.4. Les systèmes d'analyse

Le service public de télévision a commencé en 1929 par la BBC avec une analyse à 30 lignes et, à ce stade expérimental (1931 en France), l'image passe successivement à 120 et 180 lignes. Le 6 avril 1933 se font les premières démonstrations de « haute définition », 240 lignes et 25 images par seconde. L'invention de l'entrelacé, pour réduire la bande video du signal, est faite aux Etats-Unis en 1934.

Dès 1937, avec la venue de l'iconoscope, le système à 405 lignes est adopté au Royaume-Uni, les Etats-Unis choisissent 441 lignes et, en France, des démonstrations sont faites en 455 lignes et en 450 lignes. Un émetteur de 30 kW à Paris diffuse des programmes réguliers de plusieurs heures par jour. Le principe des systèmes de télévision en usage actuellement est alors bien précisé. En 1941, la définition est portée à 525 lignes aux Etats-Unis.

En Europe, l'activité reprend après la guerre et, en France, un concours est lancé pour un système « haute définition » (dans lequel R. BARTHÉLÉMY défendait un système à 1 025 lignes), qui aboutit au choix à 819 lignes lequel sera fixé par décret du 20 novembre 1948 et mis en exploitation à partir de 1950.

Entre 1950 et 1955, la plupart des pays d'Europe choisissent un système à 625 lignes, « décalqué » à 25 images par seconde du système américain à 525 lignes, 30 images par seconde. L'accord international n'a pu se faire sur un système unique.

L'exploitation de la télévision prend alors sa véritable dimension. Cette étape trouve son reflet dans les deux numéros spéciaux de *l'Onde Electrique* de novembre et décembre 1954 consacrés à la télévision et qui marquent une étape importante dans la normalisation des équipements de l'ORTF.

En juin 1953, la transmission à l'échelle européenne du couronnement de la Reine Elizabeth II avait montré d'une manière exceptionnelle l'importance internationale des échanges de programmes et de l'activité du réseau Eurovision qui venait d'être créé au sein de l'Union Européenne de Radiodiffusion.

En 1960, les perspectives de la couleur et l'ouverture d'une nouvelle bande de fréquence en ondes décimétriques (470-860 MHz) conduisent la France et le Royaume-Uni à adopter le système à 625 lignes pour les nouveaux programmes.

L'arrêté du 3 juin 1961 fixe en France les normes de ce système à 625 lignes et le Plan de Stockholm, en 1962, planifie les bandes IV et V. La seconde chaîne commence ses émissions en 1963.

3.5. La télévision en couleur

Les principes de trichromie sont connus depuis le début du siècle et dès 1928 BAIRD fait des démonstrations au moyen de disques tournants munis d'une triple spirale de perforations.

En 1940, la CBS procède à des essais d'un système à séquence de trames. Les essais se poursuivent aux Etats-Unis mettant en concurrence la CBS et RCA sur des systèmes différents.

L'acceptation officielle par la FCC du système séquentiel de trame, le 10 octobre 1950, est dénoncée trois ans plus tard et remplacée en décembre 1953, à la suite des travaux du National Television System Committee, par la normalisation du système simultané préconisé par RCA et HAZELTINE et dénommé *Système NTSC*. C'est la victoire des partisans d'un aspect qui n'est plus contesté, la compatibilité.

En Europe, les conditions économiques retardent cette évolution mais, dans les années qui suivent, divers systèmes sont expérimentés et comparés au système NTSC qui prend figure de référence.

Les caractères essentiels du système NTSC sont :

- La séparation des informations de luminance et de chrominance (principe préconisé antérieurement par M. G. VALENSI en France) et la réduction de bande des signaux de chrominance.

- La compatibilité, permettant la réception des images noir et blanc ou couleur par tout récepteur, couleur ou noir et blanc.

- L'utilisation de la modulation d'amplitude des deux signaux de chrominance sur une sous-porteuse unique, à porteuse supprimée, et spectre intégré en décalage de ligne dans le spectre de luminance (tout au moins dans la version initiale).

La détection synchrone qui est rendue nécessaire a été pendant longtemps considérée comme une technique délicate et chère.

En Europe, les études développent certaines idées neuves. Le professeur G.A. BOUTRY étudie les tolérances aux pollutions des différentes teintes et approfondit la question du pouvoir séparateur de l'œil devant la couleur.

M. H. de FRANCE adopte le principe d'un système séquentiel de ligne pour le signal de chrominance, avec l'usage d'une ligne à retard, servant de « mémoire » pour la durée d'une ligne. Le système SECAM (séquentiel à mémoire) prend sa forme définitive lorsque la modulation de fréquence remplace la modulation d'amplitude pour la chrominance et que des perfectionnements ultérieurs lui donnent ses caractéristiques définitives actuelles.

En Allemagne, le Dr BRUCH exploite l'usage de la ligne à retard du système SECAM pour développer une version du système NTSC, le système PAL, (Phase Alternate Line), qui présente des qualités voisines de celles du système SECAM vis-à-vis de la résistance aux distorsions des transmissions.

Les expériences prennent une dimension européenne avec la création d'un « groupe ad hoc pour la télévision en couleur » au sein de l'UER.

Malgré ses grandes qualités intrinsèques, cette confrontation montre les faiblesses du système NTSC lorsque les organismes de radiodiffusion ont à le confronter avec la qualité du réseau de diffusion qui doit transmettre le signal.

Après le refus d'un système NTSC adapté à 625 lignes, la confrontation entre systèmes PAL et SECAM a son aboutissement à la réunion du CCIR à Oslo en 1966 avec la division de l'Europe en deux groupes, l'un utilisant le SECAM, l'autre le PAL. Le système SECAM est fixé en France par l'arrêté du 20 janvier 1967 et son exploitation commence dès la fin de 1967 sur la deuxième chaîne de l'ORTF.

3.6. Le tube-image de la télévision en couleur

La reproduction de l'image en couleur utilise le tube à faisceau cathodique, mais la mise au point d'un tube satisfaisant s'est avérée longue et a constitué longtemps un obstacle au développement des récepteurs.

Il s'agit de produire un point d'image en excitant sélectivement trois luminophores placés dans la surface élémentaire de ce point d'image. Dès 1944 les solutions les plus diverses sont proposées. Les solutions commerciales se développent à partir de 1954 mais le *tube à masque* constitue le seul succès commercial, et sa production se fait actuellement dans de nombreux pays.

Ce tube comporte trois faisceaux d'électrons convergeant sur l'écran devant lequel une plaque perforée interpose un trou associé à un triplet de pastilles des trois luminophores rouge - vert - bleu. Le masque constitue un filtre de sélection mécanique calibrant les faisceaux, et exploitant l'angle de convergence des axes pour que chacun ne puisse exciter qu'un seul type de luminophore.

Ce filtrage de sélection peut être obtenu par d'autres types de grilles et la solution *Chromatron* utilisant un masque à fils parallèles pour séparer les trois faisceaux a donné lieu à quelques réalisations dont certaines sont encore en cours d'essais (tube à grille de la CFT en France).

Diverses tentatives sont faites pour utiliser un canon à électrons unique et une sélection dynamique de l'excitation des trois primaires. Le « tube-pomme » de Philco et le « tube-index » de Philips en sont des exemples. La commercialisation de ces tubes n'est pas abordée.

4. L'évolution des équipements de télévision ([3])

4.1. Les équipements de studio

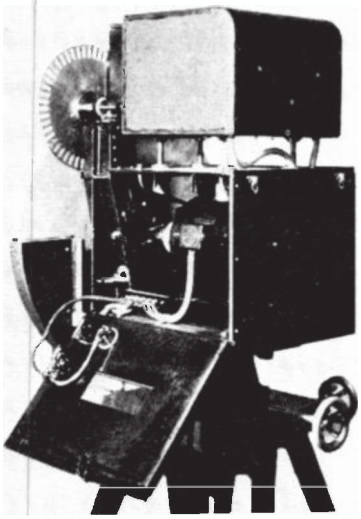
Les progrès de la télévision sont inséparables des progrès de la technologie. Il suffit de comparer la caméra à disque de NIPKOW utilisée vers 1935 à la caméra de télévision en couleur moderne pour juger des progrès accomplis (fig. 5).

Les premières caméras électroniques à iconoscope se caractérisent par l'objectif spécial de grandes dimensions qui est nécessaire. Les tubes à section image apportent la première grande amélioration en réduisant la dimension de la cible et en permettant l'emploi des objectifs commercialisés pour le cinéma 16 ou 35 mm. On peut ainsi équiper la caméra d'une tourelle de trois à cinq objectifs, commandée d'abord manuellement, puis par moteurs télécommandés. La sensibilité augmente, mais aussi la souplesse d'emploi. Les premiers cars de reportage sont exploités vers 1948 grâce aux caméras à image-Orthicon.

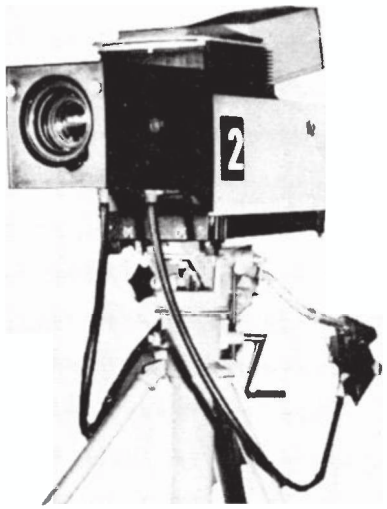
Vers 1956 apparaissent les objectifs à focale variable dits « zoom » que l'on doit principalement aux deux grandes firmes françaises Som-Berthiot et Angenieux. Les constructeurs français ont été les premiers à utiliser cette technique pour les caméras, malgré certaines limitations de rapport de focale (1 à 4). Mais la souplesse de réglage, la simplicité de commande, le silence de fonctionnement en assuraient le succès.

Le vidicon a permis le développement rapide d'un nouveau domaine d'activité de la télévision, la Télévision Industrielle, en circuit fermé, pour laquelle la simplicité et le bas prix de la caméra importait plus que la sensibilité et la qualité de l'image. Pour la radiodiffusion, ce tube, par ses faibles dimensions, était bien adapté au reportage et dès 1956, un équipement léger de reportage, totalement autonome, donnait une dimension nouvelle à la prise de vue directe d'actualité. La figure 6 montre cette caméra française exploitée lors d'un événement américain en 1956.

La télévision en couleur pose des problèmes nombreux. Elle demande la réalisation de caméras analysant séparément les images filtrées verte, rouge et bleu du système trichrome. La division de la lumière impose à chaque analyseur une grande sensibilité et l'image-Orthicon a été utilisé en premier lieu en Amérique. Les inconvénients sont multiples : dimensions très grandes, difficulté d'équilibre des réponses de transfert, bruit et taches.



1933 : Caméra à disque de Nipkow



1970 : Caméra de télévision en couleur

FIG. 6.

FIG. 7. — Caméra légère de reportage, avec liaison à 200 MHz utilisée en 1956 aux USA. ▶

([3]) Les éléments de ce chapitre ont été rassemblés par MM. M. FAVREAU et J. POLONSKY

Sur ce point, le système séquentiel de trame, qui n'utilisait qu'un seul tube analyseur, présentait un intérêt certain qui s'est prolongé pour des équipements de télévision en couleur industriels.

La télévision en couleur en Europe a coïncidé avec la commercialisation du Plumbicon et les quelques prototypes de caméras à image-Orthicon ont rapidement cédé le pas aux caméras à Plumbicon, beaucoup plus petites et d'une qualité un peu supérieure.

La difficulté importante constituée par la superposition de trois images a conduit, pendant quelques années, à développer des caméras à quatre tubes, séparant, dès l'analyse, la luminance (un tube) de la chrominance (trois tubes). Les caméras à quatre tubes ont été en concurrence avec la caméra trois tubes.

Une nouvelle génération de caméras en couleur naît actuellement. Cette caméra à trois tubes profite des progrès technologiques en matière de stabilité mais aussi de télécommandes numériques et de multiplexage des signaux sur câble unique. La microélectronique s'introduit largement pour diminuer encore le volume, alléger et faciliter l'exploitation. Un petit câble triaxial unique remplace le gros câble multiconducteur qui a si longtemps gêné le cameraman.

4.2. Le télécinéma

L'importance du film comme support d'images enregistrées est considérable et le télécinéma constitue un élément essentiel parmi les sources d'images.

Le procédé d'analyse à spot mobile, dès les débuts de la télévision, a été utilisé tant pour l'analyse des objets en direct que pour l'analyse des images, fixes ou mobiles. Le télécinéma à spot mobile s'est développé à partir de 1945 en utilisant, comme source de lumière, la lumière d'un spot sur un écran cathodique. La lumière de ce spot balayant le film est modulée par la transmittance locale du film puis reçue par une cellule photoélectrique qui fournit le signal d'image. Les principales difficultés à vaincre ont été la production d'un spot cathodique très lumineux et à très faible rémanence et l'utilisation optimale de cette lumière par une optique de focalisation à double imagerie, nécessaire pour l'analyse du film à trames entrelacées. Ce système se prête bien à l'analyse des films en couleur en supprimant toute difficulté de superposition des images.

L'autre solution, plus évidente, consiste à projeter le film sur une caméra normale de télévision. Le vidicon trouvait là son emploi, la quantité de lumière étant suffisante. Ce système permet aussi d'associer aisément plusieurs dérouleurs, d'une technique identique à celle du cinéma, à une seule caméra électronique.

Pour la télévision en couleur, la comparaison met en balance la difficulté de superposition des trois primaires de la caméra et la simplicité du dérouleur et de son objectif.

4.3. Systèmes d'enregistrement magnétique

L'industrie française, comme toute l'industrie européenne, n'a pas pris part, malheureusement, au développement de l'enregistrement du signal vidéofréquence sur bande magnétique.

Le magnétoscope a été développé à partir de 1956 par les Sociétés américaines Ampex et RCA. La mise au point récente de l'enregistrement hélicoïdal à une ou deux têtes permet cependant d'envisager un développement important de cette technique tant dans le domaine professionnel que dans le domaine amateur ou semi-professionnel.

L'enregistrement magnétique ne constitue pas la seule solution au problème. L'enregistrement d'une image de télévision sur film cinématographique est largement utilisé. Cependant l'exposition complète des deux trames pose quelques problèmes de vitesse de déplacement du film et il est fréquent de sacrifier une trame pour enregistrer une seule trame par image sur le film. Le déplacement saccadé du film peut alors se faire pendant la seconde trame.

4.4. Matériels divers

La production des programmes de télévision demande l'organisation d'un réseau complexe de circuits vidéo associant les images d'origines diverses aux points clés du réseau que sont les points de mélange, à savoir :

— au niveau de la séquence de programme, généralement dans la régie du studio, pour associer les diverses images en un enchaînement séquentiel ou simultané (truquages) ;

— au niveau de la cabine de programme pour la constitution du programme journalier associant des séquences d'origines très diverses.

Ce réseau complexe n'a pas beaucoup évolué dans son principe depuis 1950 mais s'est considérablement amélioré, du fait des progrès de la technologie. Le transistor d'une part, le point de commutation à semiconducteur, remplaçant le relais mécanique, d'autre part, en sont quelques aspects importants.

Il est nécessaire de souligner les conséquences de la microélectronique et de l'automatisation sur les développements actuels des équipements. Une nouvelle génération de matériel vidéo est en voie de développement, caractérisé par son faible encombrement et sa grande fiabilité. L'exploitation des centres de production, qui sont d'une complexité toujours plus grande, demande aussi une facilité de travail également plus grande. Elle trouvera dans cette technologie nouvelle les qualités qu'elle recherche et les moyens de contrôle et de mesure qui sont inséparables d'une maintenance efficace.

4.5. Le développement des moyens de reportage

La prise de vue directe d'actualité a toujours constitué un type de programme particulièrement apprécié par le public.

Depuis la transmission en Eurovision des 24 heures du Mans en 1954, la technique française des reportages a toujours été à l'avant-garde, aussi bien dans la réalisation des équipements industriels appropriés que dans l'étendue et la hardiesse de leur utilisation (par avion, hélicoptère, voiture, moto, etc.).

Les relais mobiles légers à 10 GHz dès 1950 et à 7 GHz ensuite ont permis à la télévision d'être en direct au cœur de l'événement. En 1955, un équipement comprenant une caméra portable à Vidicon pesant 2 kg associée à un émetteur de 0,5 W à 200 MHz, porté sur le dos du cameraman, permettait l'autonomie complète de l'opérateur. La figure 6 en montre un emploi fait en 1956 par la CBS aux Etats-Unis à l'occasion des pré-élections présidentielles à Chicago et San Francisco. Ces images étaient également transmises d'un hélicoptère qui survolait la ville.

4.6. Les équipements d'émission

Les étapes principales dans le développement du réseau d'émetteurs de télévision ont été marquées par les facteurs suivants :

— l'évolution des standards,

— l'introduction de nouvelles bandes de fréquence de plus en plus élevées,

— l'évolution de la technologie des tubes d'émission,

— l'évolution des antennes,

— l'automatisation de l'exploitation.

L'évolution des standards a été décrite précédemment. Un peu anarchique, elle a entraîné des diversités dont la France conserve les conséquences avec la modulation positive pour l'image et la modulation d'amplitude pour le son, caractéristiques qu'elle est seule désormais à conserver dans le monde.

L'introduction de bandes de fréquences nouvelles est la conséquence à la fois de la nécessité de produire de nouveaux programmes et de la possibilité technique de fabriquer les émetteurs correspondants.

Les premières émissions, en 1935, au voisinage de 30 à 40 MHz constituaient une légère extension de la technique radiodiffusion des ondes hectométriques. Dès 1948, l'utilisation de la bande III pour le 819 lignes a posé des problèmes. Dans cette bande centrée sur 200 MHz, le seul tube capable de fournir une puissance de l'ordre du kilowatt était le tube 8 D 21, caractérisé par un refroidissement à eau de toutes les électrodes y compris les grilles. Le prix élevé et la fragilité de cette « usine à eau » a conduit une équipe d'ingénieurs français à tenter, avec succès, l'utilisation à 200 MHz du tube tétrode QBW 5/3500 réputé ne pas devoir dépasser 100 MHz pour l'usage de la radiodiffusion MF. Cependant, ce tube donna 3 kW à 200 MHz en montage symétrique et modulation par contrôle de grille.

Cette expérience s'est prolongée par la production de 20 kW avec deux triodes TBW 6/20 montées à grille à la masse. Le circuit de sortie n'avait rien de canonique et ressemblait à une double gamelle dont la structure avait été établie expérimentalement et dont le mode de fonctionnement, il faut l'avouer, n'a jamais été bien compris par les auteurs eux-mêmes.

A la même époque, les bases des circuits fondamentaux des modulateurs et de la contre-réaction H F globale ont été fixées et sont encore en usage actuellement. Parallèlement, les méthodes de mesure se sont perfectionnées.

Vers 1960, l'ouverture des bandes IV et V entre 470 et 860 MHz a ouvert de nouvelles discussions entre partisans des klystrons et des tétrodes. La construction des klystrons de grande puissance dans ces bandes ne posait pas de problèmes malgré leur faible rendement. L'invention du Vapotron en France a cependant rénové la technique des tétrodes de puissance en leur permettant d'atteindre les petites dimensions compatibles avec la longueur d'onde du signal à amplifier (temps de transit, inductance des liaisons, capacités inter-électrodes).

Le refroidissement par ébullition, s'est accompagné de l'amélioration des techniques : soudures céramique-métal, géométrie des électrodes, taille des grilles dans des ébauches massives, utilisation de matériaux à pouvoir dissipatif très élevé, vide amélioré (10^{-8} mmHg). Cet effort a permis d'utiliser les tétrodes dans ces bandes et de profiter de leur haut rendement. En France, le réseau de la deuxième chaîne est ainsi équipé de tétrodes pour les puissances inférieures à 20 kW et de klystrons pour les émetteurs plus puissants.

L'amélioration de la technologie des antennes est moins spectaculaire. Cependant, la structure dipôle devant réflecteur, la plus employée, s'est améliorée. Au début, la bande passante couvrait à peine un canal de télévision avec un taux d'ondes stationnaires dépassant 1,25. Actuellement, une même antenne couvre tous les canaux de la bande III ou de chacune des bandes IV et V avec un taux d'ondes stationnaires nettement plus faible. Parallèlement, des aspects technologiques, comme la protection contre le givre, ont été considérablement améliorés.

4.7. Le réseau de faisceaux hertziens

Très rapidement le problème de la transmission des signaux de télévision entre les studios et les centres d'émission s'est posé. Le seul moyen disponible fut d'abord le câble coaxial mais dès l'apparition des faisceaux hertziens, immédiatement après la guerre, on décida en France de les utiliser, car la largeur de bande nécessaire pour le 819 lignes interdisait pratiquement l'utilisation des câbles coaxiaux. C'est ainsi que l'ORTF, après avoir tenté une expérience sur Paris-Lille, eut recours au réseau PTT, puis décida, à partir de 1955, de réaliser sa propre infrastructure de faisceaux hertziens dans la bande des 3 600 MHz. Les problèmes d'encombrement du spectre dans les grandes villes l'obligèrent néanmoins à développer, pour des liaisons de quelques kilomètres, des transmissions en vidéo-fréquence sur câbles coaxiaux.

4.8. L'évolution des liaisons à grande distance

Les mémorables retransmissions des images des cosmonautes d'Apollo depuis la lune constituent l'un des « reportages » les plus extraordinaires des temps modernes. Et pourtant, beaucoup de téléspectateurs ont peut-être accepté ces images sur leur petit écran comme constituant un événement normal du point de vue technique.

La diffusion mondiale instantanée des grands reportages comme ceux des Jeux Olympiques de Mexico, ou comme la liaison avec la lune, est aussi la conséquence d'un événement d'une grande portée, celui de l'établissement de relais de télévision satellisés.

Les premières liaisons par satellite entre continents eurent lieu en juillet 1962 par le satellite Telstar capté par la toute récente station de Pleumeur-Bodou. Ce satellite à défilement ne permettait que des transmissions courtes à des heures bien définies.

Quelques années seulement après ces premiers succès le développement des satellites synchrones permet désormais l'établissement de liaisons intercontinentales permanentes, de bonne qualité, et ces liaisons apportent un attrait considérable à la télévision d'actualité.

La diversité des normes de télévision dans le monde entraînent bien quelques difficultés, mais la technique maîtrise maintenant la réalisation des convertisseurs de définition convertissant les signaux à nombre de lignes et de trames différents, comme les transcodeurs convertissant les systèmes de codage de la couleur.

5. Conclusion

Le monde d'aujourd'hui ne saurait se passer de la radiodiffusion sonore et encore moins de la télévision. Jamais une invention n'a eu un tel retentissement sur le comportement des hommes.

Il nous est agréable d'avoir rappelé dans ce trop bref historique que la contribution des chercheurs français à cette technique a été importante et que, bien qu'elle n'ait pas été à la pointe de la technologie, l'industrie française a su apporter des idées originales dans le grand effort de création de ces instruments merveilleux de distraction, d'information et de culture que sont la radiodiffusion sonore et la télévision.

P. FOMBONNE

Ingénieur en Chef Div. Télécommunications Thomson-CSF

E. GIBOIN

Ing. Gén. G-M Inst. Fr. de Navigation

M. GIRAUD

Directeur Adjoint Navigation aérienne

Ph. GUFFLET

Ing. de la Navigation aérienne centre expérim Navigation aérienne

M. LECERF

Chef de la sous-section Navigation Service Technique aéronautique

L. LEWDEN

Chef du Dép. Radar Visualisation, et Trait. de l'Inform. Serv. Tech. de la Nav. Aérienne

J. VILLIERS

Ing. Gén. Aviat. Civ. Dir. de l'Aviat. Civ. Nord de la France

La radionavigation

Introduction *

Dès le début du XX^e siècle, les ondes hertziennes, nouvellement découvertes, ont été appliquées aux communications avec les navires à la mer, et à la navigation maritime.

• La première réalisation a porté sur un réseau de **radiophares** puissants, d'indicatifs facilement reconnaissables, installé sur les côtes ; ces radiophares ont des portées plus grandes que les phares optiques, et elles ne sont pas réduites par la brume. Ils permettent aux navires de prendre des relèvements avec leur radiogoniomètre.

Les gammes de fréquences utilisées ont été longtemps limitées à 525 kHz ; actuellement ils fonctionnent dans les deux bandes 250-525 et 1 605-2 850 kHz (**).

• Le **radiogoniomètre** a donc été utilisé pour la navigation maritime dès 1910 ; les limitations de cet appareil, dues soit aux effets perturbateurs de la coque et des superstructures des navires (qui peuvent être compensés d'une façon analogue à celle utilisée pour les compas magnétiques), soit aux effets de propagation des ondes, c'est-à-dire principalement aux interférences entre l'onde directe et l'onde « de ciel », et aux irrégularités de cette dernière (qui occasionnent en particulier l' « erreur de nuit ») ont été étudiées d'abord par MESNY. Il existe deux types de radiogoniomètres, ceux « à cadre tournant » et ceux « à cadres fixes croisés », dit BELLINI-TOSI d'après les noms des deux chercheurs qui les ont développés vers 1907.

• Des perfectionnements ultérieurs au radiogoniomètre consistent à remplacer les relèvements auditifs par des relèvements visuels automatiques, en utilisant un tube cathodique : c'est le « **radiocompas** ». Les travaux de BUSIGNIES et l'aérien d'ADCOCK pour les ondes courtes, ont donné lieu à beaucoup d'applications militaires pour la localisation des émetteurs ; ce type de radiogoniomètre est d'un emploi assez courant pour la navigation.

• Les **signaux horaires** constituent une autre application de la TSF à la navigation, qui remonte au début du XX^e siècle ; en effet, la grande vitesse de propagation des ondes hertziennes permet de considérer que ces signaux sont reçus de façon instantanée ; on a ainsi une solution générale au problème de la détermination des longitudes. Dès 1910, le poste de la Tour Eiffel a transmis l'heure exacte de l'Observatoire de Paris pour servir à la comparaison de marche des chronomètres des navires. En 1912, la Conférence Internationale de l'Heure codifia l'émission et la forme précise des signaux.

Des dispositions nouvelles, qui remplaceront l'heure sidérale (sujette à toutes les variations du mouvement de rotation de la Terre) par le Temps fourni par un étalon atomique, viennent d'être décidées pour ces signaux horaires à partir de 1972.

• Le **radar de navigation** constitue une acquisition plus récente puisqu'elle résulte des progrès effectués pendant la seconde Guerre Mondiale. Actuellement des milliers de navires sont équipés

* Ce chapitre a été écrit par M. GIBOIN.

** Le Service des Phares et Balises, qui est responsable de leur installation et de leur entretien, et les a constamment perfectionnés, avait fait effectuer par le Laboratoire National de Radio-Electricité, vers 1931-1933, une série de mesures pour s'assurer que leur fonctionnement était parfaitement régulier et d'intensité conforme aux règlements internationaux (voir C.R. à la 3e Conférence Internationale de Signalisation Maritime, Berlin, 1937).

de tels radars, qui fonctionnent dans les bandes X (en général) ou S ; ils sont munis de tous les perfectionnements les plus récents pour combattre les effets de la pluie ou des « retours de mer » (« anti-clutter ») en agissant automatiquement sur les caractéristiques des circuits du récepteur ou sur la polarisation de l'onde émise.

Les industriels qui construisent ces radars ont amélioré leur fiabilité et développé l'emploi des semi-conducteurs et la miniaturisation ; c'est ainsi qu'il y a maintenant sur le marché des radars entièrement « à l'état solide » sans aucun tube électronique (sauf parfois un klystron).

Un perfectionnement récent a été suggéré par l'expérience : on s'est aperçu que la simple observation de l' « écran radar » ne donne pas une sécurité absolue contre les risques de collision (il y a eu des « radar assisted collisions »). En effet, ce qui apparaît sur l'écran, c'est la position relative et le mouvement relatif *actuels* des navires, à partir desquels les deux capitaines doivent extrapoler leurs positions futures, en déduire le risque possible d'abordage et prescrire la manœuvre propre à l'éviter ; mais la malchance amène parfois ces deux manœuvres à se contrarier, de sorte qu'elles ne font que déplacer le point de rencontre. On a donc complété certains radars de navigation par des dispositifs perfectionnés de « visualisation » qui anticipent les positions futures en fonction des manœuvres possibles, diminuant ainsi les risques dans les zones très encombrées.

Les Instituts de Navigation français, anglais, allemands, américains, etc., ont beaucoup travaillé ces problèmes et, par de nombreux colloques, contribué à faire du radar de navigation un instrument sûr et fiable. Les règles qui seront édictées par la prochaine Conférence Internationale sur la Sécurité de la Vue humaine en Mer (Londres, 1972) tiendront compte de l'usage très étendu des radars de navigation à bord des navires.

• Des **radars de ports,** puissants et perfectionnés, ont été aussi installés au voisinage de tous les ports importants (Bordeaux, Le Havre, Liverpool, Rotterdam, Amsterdam, Hambourg, etc.) pour guider les navires dans ces zones où le trafic maritime est très dense. Il y a même, dans les estuaires comme l'embouchure de la Gironde (pour Bordeaux) et de l'Elbe (pour Hambourg), une série de radars échelonnés dont les images sont transmises à distance et qui donnent lieu à une exploitation centralisée à partir d'un poste central. Mais il n'existe pas actuellement de système de « contrôle de trafic » maritime (on devrait plutôt dire « commande de trafic »), analogue à celui en vigueur pour les avions ; en effet, les capitaines de navires, comme les pilotes des ports et estuaires, ont toujours été jaloux de leur autorité et veulent conserver toutes leurs responsabilités en matière de navigation. C'est la raison pour laquelle tous les appareils et systèmes mentionnés ici sont appelés « Aides à la Navigation ».

• En plus du radar, les travaux effectués pendant la seconde guerre mondiale ont produit une multitude de systèmes de navigation dits « hyperboliques », « circulaires », ou encore « elliptiques », dont le principe est basé sur la comparaison des signaux reçus de **paires d'émetteurs synchronisés** par des dispositifs variés : les navires (ou avions) se situent ainsi sur des hyperboles, des cercles ou des ellipses. Suivant les gammes de fréquence utilisées, les portées des émetteurs sont plus ou moins grandes, donc la « couverture » du système est plus ou moins étendue ; on distingue les aides « à grande distance », qui peuvent avoir une couverture mondiale — celles « à moyenne distance », jusqu'à 500 nautiques environ (on parle parfois de la zone « de grand atterrissage » entre 300 et 500 nautiques des côtes, très importante pour les navires venant de la haute mer) — et les aides « à courte distance », moins de 30 nautiques (une cinquantaine de kilomètres). Les précisions de ces systèmes sont variables suivant les dispositifs utilisés, les gammes de fréquence et les puissances d'émision ; les systèmes dits « hydrographiques », ou ceux de guidage d'entrée de port, donnent une précision de localisation de l'ordre du mètre, ou encore meilleure ; pour les systèmes à grande portée, une précision de un ou deux nautiques est en général considérée comme suffisante ; mais des perfectionnements continuent à être apportés partout.

On citera dans la première catégorie le système OMEGA (non encore entièrement installé, mais dont la couverture doit être mondiale) et le système de satellites de navigation TRANSIT (satellites défilant sur orbites polaires), tous deux mis au point par la Marine des Etats-Unis dans une période toute récente ; le LORAN (de divers types, A ou C), qui date de la fin de la dernière guerre.

Dans la seconde catégorie, on mentionnera le DECCA, d'origine britannique, utilisé pour la première fois pour le débarquement de juin 1944 en Normandie, et le RANA, basé sur les recherches des Français HONORÉ et TORCHEUX à partir de 1934.

Des détails sur ces systèmes (et sur beaucoup d'autres) se trouvent dans le Document n° 39 du Bureau Hydrographique International de Monaco. D'autre part, une étude comparative détaillée des systèmes hyperboliques a été exécutée en 1970 par l'Institut Français de Navigation (pour la Direction des Recherches et Moyens d'Essais de la Délégation Ministérielle pour l'Armement). Ces deux documents sont cités ici parce qu'ils constituent une documentation de synthèse sur la question et qu'ils font le point d'une époque toute récente. Mais l'*Onde Electrique* a publié, au cours des vingt dernières années, de nombreuses études sur ces différents systèmes, et les Sections d'Etudes de la SFER (notamment la 9e Section qui est compétente pour les questions de localisation et de navigation), s'en sont beaucoup occupé.

Les systèmes ci-dessus sont dits « à multilatération », parce qu'ils font intervenir des différences de distances. D'autres systèmes basés sur des principes légèrement différents (au moins dans l'application), sont les systèmes « azimut-distance » (ou « rho-thêta » pour les Anglo-Saxons), dont le VOR-DME, utilisé surtout pour la navigation aérienne, donne le meilleur exemple.

• Il faut citer également les projets, dont on parle beaucoup au sein de l'OACI, de **satellites**

stationnaires (projet français DIOSCURES et projets américains concurrents) qui seraient utilisés à la fois pour le contrôle du trafic aérien, pour les communications des avions en route et pour la navigation maritime. Les décisions seront prises à ce sujet dans les prochaines années.

• Outre les systèmes précédents, il y a lieu de mentionner quelques **appareils connexes,** que les progrès de l'Electronique ont apportés aux navigateurs maritimes ou aériens ; ce sont :

— d'une part, des appareils de *vision nocturne,* utilisant les « transformateurs d'images », basés sur des phénomènes d'électroluminescence ou autres ;

— d'autre part, toutes les applications des *calculateurs électroniques,* pour aider la navigation en attendant son automatisation totale ;

— le « *radio-sextant* », consiste dans l'adjonction au sextant, d'un amplificateur de lumière très sensible qui utilise la lumière diffuse, très faible, des étoiles ou de la Lune, pour voir l'horizon (ou les objets) ; de ce fait, on peut, avec le sextant, viser les étoiles pendant la nuit — au lieu de ne pouvoir le faire que pendant de courtes périodes, à l'aube ou au crépuscule — et donc « faire le point », ou prendre des relèvements sur la côte, de nuit comme de jour ;

— les *transformateurs d'image en infrarouge* donnent d'autres possibilités de vision nocturne, en faisant apparaître sur un écran luminescent, les images d'objets tels que navires, avions, ports, villes, soit par procédés « passifs » (images thermiques d'après leur rayonnement propre), soit par procédés « actifs » (illumination par projecteurs infrarouges) ;

— les « *viseurs d'étoiles* » (*star-trackers*), utilisés surtout par les sous-marins, et dans lesquels la position d'une étoile est « mémorisée » par un calculateur électronique, de sorte que le viseur est « prépositionné » automatiquement, et l'étoile, plus aisément observée ;

— enfin, les *balises acoustiques* dont le développement est considérable pour la navigation ou la localisation maritime : ce sont des émetteurs d'ondes acoustiques, en général de fréquence élevée (ultrasonore), placés sur le fond de la mer ; leur émission peut être omnidirectionnelle ou dirigée, et les navires se situent par rapport à elles en recevant sur des microphones ou réseaux de microphones. Ces balises permettent, soit de suivre un chenal, soit de se placer d'une façon précise par rapport à des points donnés.

Le développement de la recherche pétrolière en mer favorise ces développements : on peut ainsi, soit retrouver des forages déjà entrepris, soit positionner les navires pétroliers par rapport aux quais, plates-formes ou tuyaux de pétrole.

La portée de ces balises — fixée par des conditions opérationnelles — n'a pas besoin d'être très grande.

En conclusion, on peut dire que, pendant ces dernières années, des progrès considérables ont été faits en navigation maritime, et ces progrès s'accélèrent encore, en raison de l'augmentation considérable du nombre et des caractéristiques des navires, laquelle nécessite une précision de plus en plus grande de localisation — surtout dans les régions resserrées.

II

CINQUANTE ANS D'ÉLECTRONIQUE AU SERVICE DE L'AVIATION CIVILE

Introduction*

Cinquante ans d'Electronique, cinquante ans d'Aviation, cinquante ans de progrès parallèles au cours desquels l'Aviation n'a cessé de jeter un défi à l'Electronique, défi toujours relevé puis toujours renouvelé (performances, poids, miniaturisation, prix, fiabilité).

Et les progrès spectaculaires et bienfaiteurs ainsi accomplis, allaient permettre à l'Espace, à son tour, de poser à l'Electronique de nouveaux problèmes et lui imposer ses redoutables contraintes.

Forte de cette nouvelle expérience, l'Electronique est aujourd'hui en mesure d'apporter une assistance encore plus puissante et efficace au développement, à la sécurité et à l'efficacité de l'Aviation Civile.

1. La navigation aérienne dans la période 1919-1940

C'est en 1919 que sont ouvertes les premières lignes de transport aérien ; les avions utilisés sont des appareils bombardiers de la première guerre mondiale, aménagés sommairement pour le transport des passagers et de la poste.

Entre les deux guerres, on peut considérer trois périodes dans le développement de l'aviation commerciale et l'organisation des services et installations de Navigation Aérienne.

— 1919-1928/29 : période expérimentale

— 1928/29-1934 : période de constitution des réseaux de lignes aériennes, de mise au point des moyens d'aides à la navigation et des procédures d'utilisation

— 1934-1939/40 : standardisation des procédures et des méthodes d'exploitation, réalisation d'une infrastructure d'aides radio couvrant le territoire.

1.1. Période 1919-1929

Les bombardiers aménagés et les premiers avions construits spécialement pour le transport aérien ne possèdent pas d'équipements de pilotage sans visibilité. Les vols sont, en règle générale, effectués à vue, sur certaines routes des phares lumineux sont installés. Des essais de service de nuit ont lieu dans des conditions assez précaires.

* Ce chapitre a été rédigé par J. VILLIERS, en tant que chargé de mission auprès du Directeur de la Navigation aérienne pour les questions de recherche scientifique et technique.

Courant 1928, apparaissent les premiers avions équipés d'un tableau de bord permettant le pilotage sans visibilité (Fokker mono ou trimoteur).

Des stations radioélectriques (MF) sont installées pour assurer les liaisons radiotélégraphiques entre aérodromes et des liaisons avec les aéronefs en vol : ces dernières sont d'abord effectuées en radiotéléphonie, le rôle d'opérateur de bord étant confié à des mécaniciens. L'usage de la radiotéléphonie se heurte à des difficultés multiples : mauvaise qualité de la modulation, faible portée, absence de vocabulaire aéronautique européen.

Dès 1925, certaines compagnies recrutent des radioélectriciens ou transforment les mécaniciens navigants en opérateurs radiotélégraphistes. L'utilisation du code international rend possibles les communications entre stations desservies par des opérateurs de langue différente.

Les premières installations de radiogoniomètre moyenne fréquence sont expérimentées à partir de 1923. En 1925-26 une première installation mise au point par le Service de la Navigation Aérienne entre en service à Louvres (près du Bourget).

Des radiophares MF à cadres croisés et signaux enchevêtrés sont installés à Bobigny, Abbeville et Lézignan.

1.2. Période 1929-1934

C'est la période de démarrage d'une exploitation régulière tous temps des lignes aériennes, de définition et de réalisation d'une infrastructure d'aides à la navigation et à l'approche des aérodromes. Les procédures d'utilisation des moyens radioélectriques sont clairement définis dans le règlement du service international des télécommunications. Après les avions du type Fokker apparaissent les trimoteurs métalliques (Ju 52 puis Wilbault), dotés de radiogoniomètres de bord.

Au sol, les radiogoniomètres MF à cadre sont au point. Ils permettent la constitution d'un réseau d'aides à la navigation couvrant la totalité du territoire national et la majeure partie de l'Europe. La méthode d'atterrissage radioguidée (méthode ZZ) est mise au point. En France, le pilote GENIN effectue sur trimoteur Farman, au terrain du Bourget, les premiers atterrissages par mauvaise visibilité dans des conditions correspondant à la phase II (1933-1934).

1.3. Période 1934-1939/40

Les installations au sol, les procédures d'utilisation, ainsi que des équipements de bord sont pratiquement standardisés. En France, le territoire est divisé en neuf circonscriptions aéronautiques avec, pour chacune d'elles, une station principale de protection radioaéronautique, équipée de radiogoniomètres à cadres, puis vers 1936 de radiogoniomètres à antennes (protégée des effets de nuits, cette station assistée de stations radiogoniométriques de collaboration, est responsable des communications de l'assistance de la navigation et de la prévention des risques de collision. En pratique, chaque liaison avec un aéronef donne lieu à l'établissement d'une position. Les stations principales exercent un contrôle positif des aéronefs de transports publics en vol. Des zones réservées à l'entraînement des équipages militaires sont délimitées.

Dès 1936, on procède à des essais de radiophare d'atterrissage fonctionnant en ondes métriques. Les constructeurs (LORENZ, puis LMT) éprouvent des difficultés de mise au point dues essentiellement à des réflexions parasites sur obstacles avoisinant l'axe d'approche. Tout permet néanmoins de penser que, sans l'interruption de ces essais lors des hostilités, on serait arrivé à des résultats concrets assez rapidement.

— L'infrastructure comporte également des radiophares à champs tournant (prototype installé à Bar-le-Duc en 1930) et un radiophare omnidirectionnel à Abbeville. Les radiophares type Bar-le-Duc permettent à tout équipage ne possédant qu'un simple récepteur MF, d'obtenir un relèvement vrai toutes les minutes.

— L'organisation générale de l'infrastructure d'aides à la navigation correspond à ce que l'on appellera plus tard la navigation de surface. Elle correspond aux conditions générales d'exploitation des lignes aériennes et à la densité du trafic, la ligne la plus chargée étant celle de Paris-Londres.

2. La navigation aérienne après la deuxième guerre mondiale

Après la deuxième guerre mondiale le trafic aérien s'est développé avec la vitesse considérable dont on se souvient.

Il devenait nécessaire de mettre en œuvre à l'échelle mondiale un système coordonné et normalisé d'aide à la navigation, de télécommunication et de contrôle de la circulation aérienne. L'organisation de l'Aviation Civile Internationale a accompli et continue d'accomplir cette tâche avec grande efficacité.

Les moyens mis en place pendant la guerre, et plus ou moins développés ensuite, ont d'abord été utilisés :

— Navigation à grande distance : Loran et Consol pour assister la navigation à l'estime et la navigation astronomique,

— Navigation à moyenne distance : radiophares MF à bras fixes, radiocompas MF,

— Télécommunication à grande distance : télégraphie HF bientôt remplacée par la radiotéléphonie HF,

— Télécommunication à moyenne distance : téléphonie VHF.

Après normalisation par l'OACI, le VOR (radiophares VHF), puis la DME (Distancemètre UHF) ont bientôt rendu caduque l'infrastructure de navigation MF dans les zones à fort trafic, tandis que

l'équipement en ILS (système de guidage à l'atterrissage) se généralisait rapidement.

Là où les conditions de trafic l'exigeaient, des radars de surveillance étaient progressivement mis en place pour faciliter le contrôle de la circulation aérienne.

Dans une première période l'objectif essentiel était de fournir les moyens à une navigation sûre et d'assurer le maintien de communications continues. Tant que la densité du trafic n'était pas trop élevée, le contrôle de la circulation aérienne n'imposait guère d'exigences spécifiques.

Mais cette situation ne devait pas durer, en raison de l'encombrement croissant de l'espace et des aéroports dans certaines régions.

Afin d'optimaliser l'utilisation de l'espace et des pistes et en conséquence de rendre minimaux les délais d'attente en vol et au sol, les organismes de contrôle ont besoin de connaître avec une précision croissante les positions actuelles et futures des avions.

Il en est rapidement résulté des contraintes nouvelles sur la précision des moyens de navigation ainsi que sur le volume et la qualité des communications échangées. L'exercice du contrôle de la circulation aérienne exigeait aussi la mise en place d'un réseau de plus en plus dense de radars de surveillance. L'installation de radars secondaires et l'équipement rapide des avions en transpondeurs — qui réémettent une réponse codée aux interrogations du sol — allaient ensuite permettre de franchir une nouvelle étape en facilitant l'identification continue des avions (4 096 codes disponibles) et la connaissance de leur niveau de vol (réponse altimétrique), tout en autorisant une diminution significative du volume des communications radiotéléphoniques.

La navigation aérienne ne peut plus se concevoir que sous la forme d'un vaste système d'informatique dans lequel la navigation, les communications et la localisation par le sol constituent des sous-ensembles largement dépendants les uns des autres.

Clef de voûte de cet édifice, l'exercice du contrôle de la circulation aérienne consiste à effectuer en « temps réel » l'acquisition, la corrélation, la mise en forme et l'exploitation des informations.

Au fur et à mesure de l'augmentation du trafic et de la vitesse des avions, il devient nécessaire de traiter une quantité croissante d'informations dans un temps de plus en plus court en vue de résoudre des problèmes de plus en plus nombreux et complexes.

L'augmentation du nombre de contrôleurs dans les centres et tours de contrôle ne constitue qu'un palliatif provisoire, inapte à lui seul à maintenir une efficacité satisfaisante au système.

Dans ces conditions, il est naturel qu'on ait songé à recourir au service des calculateurs. Le rôle joué par ces derniers est encore modeste aujourd'hui en raison de l'extrême complexité du problème posé — notamment dans le domaine des relations homme-machine — mais il ne fait plus aucun doute qu'ils constitueront de plus en plus un outil majeur dans la conception des nouveaux systèmes.

La décennie qui commence s'ouvre sur des progrès importants dont on peut entrevoir les plus significatifs :

— A *grande* distance, la navigation par centrale à inertie, la localisation et les télécommunications par satellites permettront de réduire notablement les séparations entre les avions et de supprimer progressivement les moyens de navigation basés au sol et les télécommunications HF.

— A *moyenne* distance, les VOR/DME permettront la navigation de surface, tandis que la mise en œuvre de liaisons codées diminueront la charge dans le cockpit et dans les centres de contrôle.

— Les progrès de l'ILS (éventuellement relayé par un nouveau système) permettront de s'approcher des conditions d'atterrissage sans aucune visibilité. (actuellement limitées à une hauteur, dite critique, de 15 m).

— Les progrès de l'automatisation apporteront aux contrôleurs de la circulation aérienne une aide de plus en plus efficace pour leur permettre de faire face à une situation de plus en plus complexe.

Les quelques pages qui suivent donnent un aperçu des réalisations les plus modernes qui apportent d'ores et déjà leur contribution au développement de l'Aviation Civile et qui sont de nature, par leurs perfectionnements ultérieurs, de lui permettre d'assurer l'essor considérable que les prévisions lui promettent.

III

L'AUTOMATISATION DU CONTROLE DE LA CIRCULATION AÉRIENNE*

Le contrôle de la circulation aérienne qui a pour mission de garantir la sécurité des vols dans tout l'espace aérien, se trouve pris dans une évolution extrêmement rapide étant donné l'essor du transport aérien.

Ce contrôle est effectué par trois centres régionaux (Paris, Aix-en-Provence et Bordeaux) et un grand nombre de centres de contrôle d'approche et de tours de contrôle d'aérodromes. A l'intérieur de chacun de ces centres, les tâches sont réparties entre plusieurs individus qui ont à coordonner en temps réel leur activité en tenant au mieux compte de toute l'information disponible.

Ces informations sont de deux types :

— Les plans de vol qui sont déposés par chaque aéronef entrant dans le système de circulation aérienne générale.

— L'information radar primaire et secondaire.

L'automatisation, telle qu'elle a été développée en France depuis 1962, a consisté à collecter au maximum cette masse d'informations de façon à la présenter *au mieux, au moment le plus opportun, au bon destinataire.*

* Ce chapitre a été écrit par Ph. GUFFLET.

Dans une première phase, le système automatisé traitait les plans de vol, préparant les « bandes de progression » (strips) qui présentent sur une bande de papier, pour chaque secteur, les éléments de trajectoire, d'heure et de niveau ; en même temps, le système conservait en mémoire le plan de vol, ce qui était une condition pour permettre les développements ultérieurs.

Dès 1964, une deuxième phase était étudiée, consistant d'une part à se servir de l'ordinateur pour assurer les coordinations nécessaires entre contrôleurs, d'autre part à traiter l'information radar.

Pour l'aboutissement de cette deuxième phase, des équipements de visualisation synthétique, claviers, extracteurs radar ont dû être développés.

Mise en service fin 1968, elle a permis :

— La mise à jour de tous les plans de vol existant dans le système ;

— L'identification automatique sur les écrans radar des avions équipés de transpondeurs radar secondaire à 4 096 codes ;

— La mise à jour des plans de vol par l'information radar qui y est corrélée.

Les développements actuels du système vont tendre à généraliser cette automatisation aux trois centres français (fin 1971), étendre la couverture radar par l'implantation de moyens de déports numériques des informations radar éloignés.

A la fin de la phase II (fin 1972), le calculateur aura à sa disposition les positions instantanées de tous les vols (position radar), et les informations permettant d'extrapoler leur déroulement à moyen terme (plans de vol mis à jour).

Nous pourrons alors envisager une phase III qui consistera à :

— évaluer à chaque instant, en fonction des espacements procéduraux à l'entrée d'un secteur de contrôle, la charge de travail futur du contrôleur radar,

— surveiller l'évolution des avions en conflit radar potentiel,

— détecter et présenter au contrôleur ces conflits au moment opportun.

Le contrôleur reste maître de la situation, le calculateur n'étant là que pour filtrer l'information utile et la présenter de manière optimale.

La mise en œuvre du système automatisé en France a suivi une démarche originale, en implantant directement les moyens utiles à son développement dans un centre en exploitation. Cette méthode a permis d'obtenir un temps de réponse aussi court que possible entre les développements techniques du système et les réactions opérationnelles et humaines à ces développements.

Cette automatisation a contribué également à susciter dans l'industrie électronique française le développement de techniques de pointe pour la réalisation des équipements de visualisation numérique et d'extraction radar, lesquelles sont maintenant tout à fait concurrentiels sur le plan international.

IV

LE RADAR ET LE CONTROLE DE LA NAVIGATION AÉRIENNE*

L'utilisation du radar par les Services de Contrôle de la Navigation Aérienne est liée au développement considérable du trafic aérien depuis la fin de la dernière guerre. Il y a à peine quinze ans, seuls existaient en France quelques radars d'aide à l'approche et à l'atterrissage, alors que maintenant une infrastructure permettant d'assurer une couverture radar continue des espaces contrôlés est en cours de réalisation.

Cette évolution a été très rapide, non seulement en ce qui concerne les matériels, mais aussi le rôle qui est dévolu au radar. Le radar n'est plus utilisé comme aide à l'approche et à l'atterrissage, non qu'il soit difficile de réaliser des matériels satisfaisants pour ce type d'utilisation mais parce que la préférence a été donnée à des systèmes qui permettent aux pilotes de rester maîtres de leurs décisions. Le radar est utilisé pour fournir aux contrôleurs des informations précises sur la position des avions et leur permettre d'assurer la régulation et la sécurité du trafic aérien : le pilote dispose de moyens de navigation et d'atterrissages indépendants.

Par rapport à des pays comme les Etats-Unis et l'Angleterre, la France a démarré assez tard la mise en place d'une infrastructure « radar de surveillance ». Mais elle s'est efforcée alors de rechercher des solutions originales, n'hésitant pas à faire appel aux techniques les plus récentes pour concilier les exigences des contrôleurs et les contraintes budgétaires.

Déjà au début des années 60, diverses solutions avaient été mises en œuvre pour améliorer la qualité des images présentées aux contrôleurs, en se basant sur le fait que les avions civils ne volent pas très bas : en évitant d'envoyer ou de recevoir l'énergie vers le sol, les échos de sol sont très atténués. Les techniques utilisées n'autorisaient pas une grande portée (antenne semi-enterrée), ou étaient incompatibles avec l'utilisation d'un éliminateur d'échos fixes ou MTI (antenne à double couverture alternée), bien utile malgré les défauts que présentaient alors ce type de matériel.

En profitant de ces expériences, ainsi que des essais d'adjonction, sur une antenne existante, d'un deuxième cornet utilisé en réception seulement, une nouvelle gamme de matériels radar de surveillance a été définie qui reprend certaines caractéristiques, maintenant classiques, de la génération précédente (polarisation circulaire, diversité de fréquence, émetteur utilisant un magnétron de très grande durée de vie, récepteur à très faible facteur de bruit, etc.).

Mais en plus des améliorations technologiques que les progrès techniques ont rendu possibles, la qualité de l'image devrait être très supérieure grâce aux trois points suivants :

1. L'antenne utilise la technique du double cornet, l'un en émission-réception, l'autre en réception ;

* Ce chapitre a été écrit par L. LEWDEN.

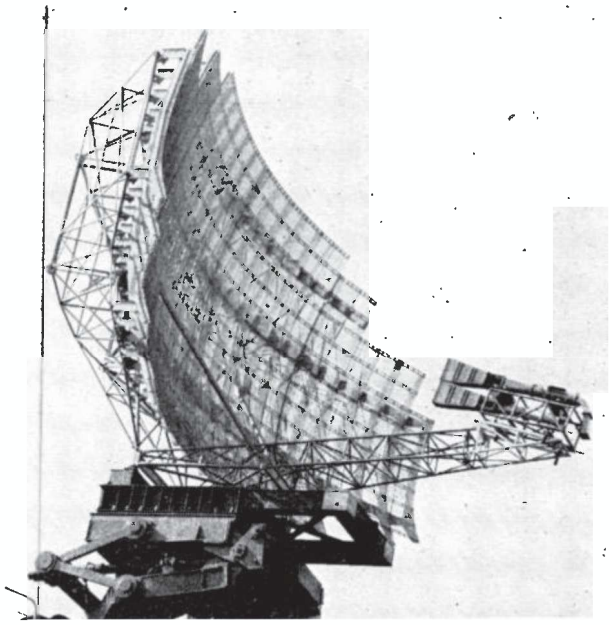


FIG. 1

mais le réflecteur a été adapté à ce type d'utilisation, en utilisant des méthodes de calcul moderne, ce qui confère à cette antenne des qualités que l'on n'avait pu obtenir par une simple adjonction d'un deuxième cornet à une antenne existante. On bénéficie ainsi d'une bonne discrimination en site entre avion et échos de sol même à des distances importantes de la station et ce type d'antenne est compatible avec l'emploi d'un éliminateur d'échos fixes (MTI) de conception simple.

2. L'éliminateur d'échos fixes (MTI) utilise les techniques numériques de traitement et de mémorisation, supprimant ainsi les défauts qui rendaient son emploi coûteux (à l'achat comme en maintenance) et améliorant la qualité des résultats (sensibilité moindre aux vitesses aveugles, intégration qui supprime de nombreux résidus, etc.).

3. Il est maintenant possible de traiter les informations obtenues sur les différentes voies (couverture haute, couverture basse, vidéo provenant de l'éliminateur d'échos fixes) pour présenter à chaque instant, en fonction des conditions de propagation, du relief, des brouillages divers, une image optimalisée.

L'augmentation très importante du trafic aérien a rendu les contrôleurs beaucoup plus exigeants qu'il y a quelques années sur la qualité des informations radar qui leur sont fournies. Cette refonte totale des équipements radar primaire, aussi bien les radars de centres de contrôle (longueur d'onde 23 cm, portée 180 NM, 6 tr/mn) que les radars de zone terminale (longueur d'onde 23 cm, portée 100 NM, 15 tr/mn) ou les radars d'aérodromes (longueur d'onde 10 cm, portée 60 NM, 15 tr/mn), permet de satisfaire les besoins des services de contrôle, même dans les environnements les plus difficiles.

Mais ce qui certainement plus important encore que la possibilité ainsi offerte d'obtenir de très bonnes images radar, même dans les sites les plus difficiles, sans nécessiter la mise en œuvre de matériels délicats et coûteux, c'est que, dans de nombreuses régions, on ne peut plus considérer un radar comme une installation isolée.

L'un des problèmes qui se pose maintenant aux organismes de contrôle de trafic aérien est de connaître à chaque instant la position précise de chaque avion contrôlé, et de présenter à chaque contrôleur les informations dont il a besoin (et de préférence *seulement celles* dont il a besoin) pour assurer la régularité et la sécurité du trafic aérien. Pour résoudre ce problème, en l'état actuel de l'équipement des avions, il fallait donc concevoir un système complet de détection, de déport d'informations, de traitement et de visualisation.

Une infrastructure permettant de visualiser avec une précision satisfaisante tous les avions volant dans les espaces contrôlés est donc en cours de mise en place en France. Il a fallu pour cela développer une gamme complète de matériels nouveaux.

Les stations de détection (13 de ces stations sont prévues pour l'ensemble de la France) comportant : radar primaire, interrogateur radar secondaire, extracteur pour numériser et associer ces informations puis les filtrer et les transmettre vers les centres d'exploitation.

Aux centres d'exploitation, les calculateurs recueillent ces informations radar et composent les images à l'usage des contrôleurs en y intégrant, dans la mesure du possible, les informations contenues dans les plans de vol ou reçues des contrôleurs.

Dans un tel système, chaque élément doit apporter sa contribution au résultat recherché. Par exemple, le radar primaire permet l'identification de la plupart des avions : les problèmes d'identification des avions détectés par le radar primaire pour lesquels il n'y a pas de réponses radar secondaire (défaut d'équipement, brouillages, etc.) sont ainsi très simplifiés ; la composition des images se fait en tenant compte de la qualité de détection de chacun des radars qui contribuent à assurer la couverture : certains problèmes de fiabilité, de mauvaise propagation, de « cône mort » s'en trouvent atténués, surtout en espace supérieur.

Il est donc intéressant de considérer ce problème de connaissance de la position des avions sous l'aspect système plutôt que comme un problème radar. On peut alors mieux apprécier les possibilités d'évolution dans les années à venir.

Dans l'immédiat, on s'efforce de prolonger ce système de détection jusque sur les pistes des aéroports. Des équipements utilisant la technique du radar Doppler à impulsion sont en cours de développement pour assurer la surveillance de tous les mouvements sur les pistes et les axes d'approche finale.

Dans un avenir rapproché, il est probable que le système tel qu'il est en cours de mise en œuvre donnera satisfaction pour le trafic en route mais qu'il s'avérera peut-être insuffisant, soit par manque de précision, soit par saturation du radar secondaire, dans certaines zones terminales à trafic élevé.

Dans le choix des solutions pour résoudre les problèmes qui se poseront dans l'avenir, il faudra tenir compte de très nombreux facteurs qui n'ont pas

à être examinés ici. Mais le fait de disposer, au bénéfice des contrôleurs, d'un système de détection (ou de localisation), indépendant du système de navigation utilisé par les pilotes, constitue une redondance utile et rassurante.

Il ne faudra pas non plus minimiser les longs délais nécessaires pour installer sur une proportion suffisante d'avions un équipement nouveau : si la croissance du trafic aérien continue à un rythme élevé, la solution des problèmes à moyen terme ne pourra alors être recherchée que dans l'amélioration, coûteuse mais plus rapide à mettre en œuvre, des moyens de détection.

V

LA NAVIGATION AUTONOME*

1. Introduction

On entend par navigation autonome celle effectuée sans recours à une infrastructure au sol. Schématiquement il faut donc disposer d'une vitesse et d'un cap. La mesure de la pression totale a été la première utilisée pour connaître la vitesse ; elle est à la base des systèmes anémométriques.

Pour améliorer la précision intrinsèque et s'affranchir du vent, on a ensuite utilisé l'effet Doppler sur des faisceaux électromagnétiques émis à bord.

Ces sources, si elles sont autonomes au sens indiqué plus haut, font appel au milieu extérieur ; la navigation par inertie s'en affranchit car elle ne nécessite que la connaissance du champ de gravitation en fonction du lieu.

Le cap peut être fourni par une sonde magnétique ; on améliore la précision en lissant les erreurs à court terme à l'aide d'un gyroscope. Quand la qualité de celui-ci est suffisante, on peut se passer de la référence magnétique ; c'est le cas pour les centrales à inertie.

Quelles que soient les sources employées, l'erreur d'un système autonome dépend du profil du voyage, suivant des modèles d'ailleurs très variables.

2. Les systèmes anémométriques

Les premiers systèmes de navigation à l'estime apparus en France utilisaient la mesure de pression comme source de vitesse et un compas magnétique comme source de cap.

Les équations à résoudre sont les suivantes (en régime subsonique) :

$$V_p = CM$$
$$C = k\sqrt{T_s}$$
$$M^2 = 5(r^{2/7} - 1)$$

en supposant $\gamma = 1{,}4$

avec V_p : vitesse aérodynamique vraie,

C : vitesse du son,

k : constante,

T_s : température statique,

M : nombre de Mach,

r : rapport pression totale/pression statique.

C'est en 1910 que A. ETÉVÉ, un Français, mit au point le premier anémomètre. Le Comte MENGDEN, Russe émigré en France, construisit un véritable système de navigation. Le cap était mesuré à l'aide d'un détecteur magnétique, sorte de boussole dont le boîtier était asservi à l'aiguille par une détection électro-optique. La vitesse était fournie par un moulinet, dispositif qui ne tient pas compte de la température et de la pression statique. L'ensemble entraînait une plume se déplaçant sur une carte.

Vers 1935 naît la totalisateur du Général GARNIER, réapparu après la guerre sous l'étiquette GARNIER-CROUZET. La vitesse propre est projetée suivant le parallèle et le méridien, ce qui permet de calculer les accroissements de latitude et longitude par les formules

$$\Delta L = \int V_p \cos C_v \, dt ,$$

et :

$$\Delta G = \int V_p \frac{\sin C_v}{\cos L} dt .$$

Un différentiel mécanique permet d'introduire le déplacement dû au vent, ce dernier étant affiché en force et direction par le pilote.

Les premiers compas gyromagnétiques (c'est-à-dire où la dérive du gyroscope est compensée par un asservissement très lent — quelques degrés par heure — sur un détecteur magnétique) sont apparus avant la guerre. Citons en particulier l'appareil THEDENAT-ALKAN type 103.

Après guerre, vers 1947, sont apparus les compas BÉZU et SFENA. La correction d'azimut est effectuée à l'aide de bobines agissant sur le cadre de site du gyroscope. Vers la même époque, apparaissaient les anémomètres compensés, c'est-à-dire tenant compte de la pression statique et de la température. Citons les matériels :

— Garnier-Crouzet destiné au totalisateur d'estime du même nom, et qui utilise une corne taillée,

— Bronzavia qui utilise une vis à pas variable,

— Legpa type 10 qui constitue probablement le premier capteur de pression à rappel électrodynamique.

Ces matériels ont équipé les avions Vautour type N et B, ainsi que les premiers Mirage III R de ce genre. Le totalisateur d'estime est encore utilisé sur Breguet Alizé.

Indépendamment des erreurs dues à la réalisation mécanique, la précision est limitée par la mauvaise connaissance que l'on a du vent, surtout à haute altitude. Il devenait donc indispensable de trouver une méthode pour mesurer la vitesse par rapport au sol et non plus la vitesse aérodynamique.

* Ce chapitre a été écrit par M. LECERF.

2. Les systèmes à effet Doppler

La solution existait depuis un certain temps aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne, mais le secret avait été remarquablement bien gardé. Ce n'est qu'en 1957 que l'existence des radars à effet doppler fut connue en France.

Le principe, bien connu, est le suivant :

Une onde émise par un corps en mouvement par rapport à un autre est reçue par ce dernier avec un écart de fréquence v/c où v est la vitesse de rapprochement et c la vitesse de propagation.

En pratique, l'onde est électromagnétique dans la gamme SHF et le récepteur est placé sur l'avion et utilise la partie de l'onde renvoyée par le sol. On mesure donc deux fois l'effet Doppler.

En émettant trois faisceaux, on peut obtenir les composantes de la vitesse dans trois axes, donc aussi dans un système d'axe quelconque par changement d'axes.

Après une première étape financée en France, les radars Doppler ont été réalisés par la CSF sous licence MARCONI pour les avions Mirage III E et Mirage IV. Il s'agit de radars à antenne mobile : la mesure de la composante latérale de la vitesse sert à faire tourner l'antenne autour de l'axe de lacet jusqu'à annuler cette vitesse latérale. D'autre part, l'assiette longitudinale mesurée par un gyroscope de verticale asservit l'antenne à l'horizontale. On obtient donc directement la vitesse horizontale et la dérive.

Sur l'Atlantic et le Transall, l'antenne est fixe ; les composantes mesurées sont suivant les axes longitudinaux et latéraux de l'avion.

C'est pour l'hélicoptère de lutte anti-sous-marine que fut effectuée la première étude française de doppler il s'agit de l'ALTO II réalisé par l'Electronique Marcel Dassault.

Le Jaguar est équipé d'un radar à antenne fixe fabriqué sous licence DECCA. Pour être homogène avec la précision sur la vitesse (précision qui peut être meilleure que 0,5 %), il importe que le cap soit fourni avec une précision du degré.

Le compas gyromagnétique s'avère rapidement insuffisant. On a alors recours à une centrale gyroscopique : un gyroscope de verticale stabilise à l'horizontale une plate-forme sur laquelle est monté un gyroscope directionnel de bonne qualité, c'est-à-dire dont la dérive est de l'ordre de 0,1 °/h. Un calculateur de cap transforme l'indication du directionnel en cap vrai en tenant compte de la rotation terrestre et du chemin parcouru.

Après des fabrications sous licence SPERRY et KEARFOTT, sont apparues les premières centrales étudiées en France par la Société BEZU, puis par la SFIM.

3. Les systèmes à inertie

Le principe de la navigation par inertie consiste à utiliser la mesure des accélérations suivant trois axes pour obtenir, par intégration, la vitesse puis la position du mobile.

Le système de base comprend donc trois accéléromètres et des gyroscopes. Ces derniers, au nombre de deux ou trois suivant leur type, fournissent l'orientation de la plate-forme dans l'espace absolu ; les accéléromètres mesurent chacun suivant leur axe sensible, la différence entre l'accélération et les forces à distance appliquées à l'équipage mobile. Ces dernières se limitent aux forces d'attraction newtonienne dans la mesure où l'équipage mobile est protégé contre les champs perturbateurs.

La possibilité de naviguer par inertie est donc liée à la connaissance que l'on a des forces d'attraction universelle (et non de la pesanteur apparente) ; la précision de cette navigation est, par le fait même, limitée par la précision avec laquelle on connaît le champ de ces forces en tout point.

Tant que les trajectoires restent voisines de la surface de la terre, c'est-à-dire pour les véhicules autres que les engins balistiques, la notion de verticale est fondamentale pour le pilotage et la plate-forme, initialement collée à la verticale, est asservie à tourner pour compenser la rotation de la terre et au déplacement du mobile à sa surface. Ceci est réalisé par un bouclage entre accéléromètres et gyroscope pour réaliser l'équation différentielle :

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{v}{R},$$

où v est la vitesse horizontale, R le rayon de la terre et $d\alpha/dt$ la vitesse de précession de la plate-forme autour d'un axe horizontal perpendiculaire à la trajectoire. L'équation ci-dessus peut aussi s'écrire :

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{1}{R}\frac{dv}{dt} = \frac{1}{R}\gamma .$$

Ce bouclage réalise un pendule, comme on peut le voir si l'on cherche les mouvements de la plate-forme après qu'elle ait été écartée de sa position d'équilibre :

$$\frac{d^2(\alpha+\Delta\alpha)}{dt^2} = \frac{1}{R}(\gamma - g\Delta\alpha) .$$

En combinant avec la relation précédente :

$$\frac{d^2\frac{\Delta\alpha}{dt}}{dt^2} + \frac{g}{R}\Delta\alpha = 0 .$$

Ce pendule est appelé pendule de SCHÜLER ; sa période vaut :

$$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{R}{g}} \simeq 84 \text{ mn} .$$

Les premières études ont commencé en France vers 1952. Il ne s'agissait alors que d'études de principe

sur la structure du système et sur la précision des composants, études menées par différentes firmes en collaboration très étroite avec le service Technique Aéronautique.

Vers 1960, l'utilisation du guidage par inertie était retenue pour les engins balistiques pour lesquels il n'existe d'ailleurs pas d'autres solutions. Ce programme a été mené à bien, comme l'on sait, avec des plates-formes SAGEM.

Dans le domaine de l'aéronautique militaire, la même position avait été prise, mais en faveur de la centrale LITTON qui équipe les F 104 allemands. Finalement, c'est le Doppler qui l'a emporté en France. Le temps de fonctionnement sur un avion est beaucoup plus long que sur un engin et les exigences sur les dérives de gyroscopes plus sévères. A l'époque la navigation à inertie pour avions présentait encore bien des aléas.

L'effort s'est néanmoins poursuivi à la SAGEM qui a équipé les prototypes Concorde en collaboration avec FERRANTI.

4. Conclusion

Les techniques de navigation autonome ont évolué très vite ; il suffit, pour s'en rendre compte, de se rappeler comment étaient équipés les premiers avions supersoniques.

Quelques tendances, d'ordre très général, méritent d'être soulignées :

— La navigation anémométrique n'est plus utilisée que sur des systèmes très simples. Les équipements anémométriques, par contre, deviennent des fournisseurs d'information pour beaucoup de systèmes : pilotage, conduite moteur, anticollision, etc.

— On s'achemine vers des systèmes intégrés pouvant faire appel à des recalages radio, au Doppler, à l'inertie, pour obtenir la meilleure estimation du point par un traitement adéquat des informations.

— Toute la circulation aérienne a été conçue avec utilisation du cap magnétique. Avec les systèmes les plus récents, on connaît le cap géographique à quelques minutes près et le cap magnétique à environ 0,5° près. On envisage d'ores et déjà de mettre en mémoire la déclinaison en fonction de la position géographique et de fonctionner en cap magnétique calculé.

VI

LES SYSTÈMES COOPÉRATIFS DE NAVIGATION ET DE LOCALISATION*

1. Généralités

Un système « *coopératif* » de radionavigation ou de radiolocalisation repose sur des liaisons radioélectriques établies entre des repères et l'objet ou le mobile à localiser. Ces liaisons font intervenir un organe actif, émetteur ou récepteur, à chaque extrémité. C'est une différence notable par rapport aux systèmes de détection qui fonctionnent grâce à des échos, ou par rapport aux systèmes autonomes — qui tout « autonomes » qu'ils soient — ne peuvent parfois pas se passer de la présence d'un réflecteur passif.

Les systèmes coopératifs, dont la carrière n'est certainement pas terminée, ont régné sans aucun concurrent jusqu'à la deuxième guerre mondiale. Au départ, ils n'ont fait que transposer dans le domaine hertzien les techniques de localisation par mesures d'angles de la navigation traditionnelle. Ils profitaient du fait qu'un signal radioélectrique se propage « en ligne droite » comme un signal optique, tout en étant à la fois bien moins sensible que ce dernier aux conditions météorologiques et mystérieusement capable de contourner l'horizon, aux fréquences assez basses qu'on savait produire au début du siècle. Mais, au cours d'un développement prodigieux qui devait recevoir les impulsions les plus décisives des besoins de l'aéronautique, ces systèmes devaient peu à peu tirer parti de possibilités moins évidentes offertes par le signal radioélectrique.

2. Les systèmes angulaires

2.1. La radiogoniométrie

Comme le nom l'indique, les systèmes angulaires permettent de localiser l'objet intéressant en ne faisant que des mesures d'angles. Ils sont tous plus ou moins les descendants de la radiogoniométrie. En 1914, les procédés fondamentaux de cette technique avaient été découverts : cadre rotatif, simulation d'une antenne tournante avec le système BELLINI-TOSI (*La Lumière Electrique*, vol. 5, 1909), méthodes diverses de levée d'ambiguïté. Le développement s'accéléra au cours de la première guerre mondiale, en particulier grâce à l'invention de la lampe amplificatrice qui permit d'accroître la sensibilité des récepteurs.

Les portées augmentant, on se trouva aux prises avec les célèbres « erreurs de nuit » dont l'origine était encore très mystérieuse quand *l'Onde Electrique* commençait de paraître (MESNY, *O.E.* n° 1, janvier 1922). Le remède suggéré par ADCOCK en 1926 ne fut à peu près au point que vers 1935 (cf. BUSIGNIES, *O.E.*, mars - avril 1938).

Parti des ondes moyennes, le domaine de la radiogoniométrie atteignait la bande VHF à la veille de la deuxième guerre mondiale. On avait fait aussi des progrès dans la présentation des informations. Les appareils à lecture directe, à la mise au point desquels ont contribué WATSON-WATT (1926) et en France, parmi bien d'autres, BUSIGNIES (*O.E.*, juillet 1927) et MARIQUE (*O.E.*, août 1931), tendaient à s'imposer, en particulier pour les applications aéronautiques.

L'installation d'un radiogoniomètre sur un bateau ou un avion présente de grandes difficultés. Les erreurs systématiques qu'on observe alors ont été étudiées par MESNY dès 1920 (*Radio Revue*, 1920) et une théorie

* Ce chapitre a été écrit par P. FOMBONNE.

générale en a été donnée par FROMY (*O.E.*, février, mars, avril 1936). Le radiogoniomètre aéroporté, ou comme on dit le « radiocompas » doit beaucoup aux travaux de BUSIGNIES (*O.E.*, septembre 1930). L'utilisation en avait été envisagée très tôt par FRANCK (*O.E.*, février 1924). Originellement système d'observation et de « routage », la radiogoniométrie devenait ainsi un véritable système de navigation coopératif (cf. FRANCK, *O.E.*, 1928 et SERRE, *O.E.*, octobre - novembre 1931).

Les derniers développements de la radiogoniométrie, depuis 1940, ont surtout consisté à combattre les erreurs de situation, avec les systèmes WULLENWEBER et DOPPLER ; ce dernier repose sur des idées émises par BUSIGNIES dès 1942.

Malgré ces progrès, l'apogée de la radiogoniométrie se situe sans doute vers 1935. Seul système radioélectrique de navigation à une certaine époque, elle est incontestablement sur le déclin mais garde de l'intérêt comme système de repérage des émetteurs plus ou moins désirables ou comme complément du radar pour l'identification des avions.

2.2. Les radiophares à axes fixes

Dès 1907, SCHELLER avait imaginé un radiophare à signaux entrelacés, fonctionnant suivant le principe des lobes alternés, idée qui a dominé avec persistance la technique des radioalignements (cf. BESSON, *O.E.*, septembre 1931). Sur le plan pratique, l'aboutissement le plus notable de ces travaux fut l'établissement du réseau de radiophares américains à quatre axes, au nombre de 300 environ en 1944, fonctionnant en ondes moyennes. Les radiophares VHF dits VAR, mis au point en 1939, ne connurent qu'une existence éphémère.

C'est en tant que systèmes d'approche et d'atterrissage que les radiophares à axes fixes devaient connaître leurs plus grands succès. Les études parallèles conduites à partir de 1929 dans tous les pays aboutirent à des systèmes hybrides assez semblables, comme le NBS, le LORENZ, le LMT (PERROUX, *O.E.*, avril 1939), combinant le guidage par lobes alternés en azimut et le guidage à champ constant dans le plan vertical.

La guerre devait assurer le triomphe de l'Instrument Landing System (ILS) qui fonctionne par comparaison d'amplitudes dans les deux plans. Normalisé par l'OACI en 1947, on peut s'attendre à ce que sa carrière se poursuive jusqu'en 1980 au moins.

Si, par suite de la guerre, l'industrie française n'a pu participer aux études initiales de l'ILS, elle a apporté, depuis une dizaine d'années, des perfectionnements notables à celui-ci et THOMSON-CSF a acquis une position prédominante sur le marché mondial. Dans la mise en œuvre de l'ILS, le STNA et l'AÉROSPATIALE ont activement poursuivi la « réduction des minimums » si bien que la compagnie AIR INTER est actuellement la seule au monde qui opère régulièrement dans des conditions de catégorie II, sinon de catégorie III A.

Fonctionnant en ondes métriques, l'ILS nécessite des antennes encombrantes et donne lieu à des erreurs de situation. Cela a suscité l'étude d'ILS en ondes centimétriques, comme l'ASV 23 de l'ex-CSF et le SYDAC de THOMSON-CSF.

2.3. Les radiophares tournants

L'ancêtre des radiophares tournants est sans doute le « compas TELEFUNKEN » de 1907, assemblage de brins rayonnants disposés en étoile et excités séquentiellement. Par la suite, bien des systèmes furent essayés mais quoique de tels appareils fussent certainement fort utiles (cf. MARTY, *O.E.*, août 1931 et BESSON, *O.E.*, septembre 1931), les besoins de l'aéronautique étaient probablement alors assez bien satisfaits par les radiophares à quatre axes, car ce n'est qu'après l'expansion de ces derniers que les radiophares tournants commencèrent véritablement leur carrière, sous la forme du VOR, préfiguré par divers essais antérieurs à 1939 et normalisé après la guerre par l'OACI. Les dernières améliorations apportées au VOR ont consisté à combattre les erreurs de situation en appliquant le principe Doppler comme dans les radiogoniomètres du même nom.

Citons aussi le TACAN, né vers 1950, fonctionnant autour de 1 000 MHz et faisant aussi fonction de répondeur DME, ce qui permet de constituer un système « angle - distance » complet (cf. *O.E.*, juin 1957). N'oublions pas non plus le CONSOL, né de la guerre, qui rend encore des services dans l'Atlantique Nord.

Les radiophares tournants retrouvent maintenant une nouvelle jeunesse sous la forme de nombreux systèmes d'atterrissage à couverture sectorielle qui, étudiés depuis 1957, prétendent à la succession de l'ILS. Naturellement, afin de réduire les erreurs de situation, toutes les études sont faites en micro-ondes avec des systèmes rayonnants de grande envergure. On trouve des systèmes inspirés du VOR ou du TACAN, des systèmes à faisceaux battants qui définissent l'angle tantôt par le temps écoulé entre un signal de référence et le passage du faisceau sur l'avion (comme le compas TELEFUNKEN), tantôt par un code quelconque (comme certaines balises « parlantes » VHF) ; enfin le dernier né, quoique conçu il y a déjà longtemps, le système à réseau de sources ommutéesc appelé aussi « DOPPLER », cousin du radiogoniomètre et du VOR DOPPLER.

Si l'industrie française ne peut prétendre être à l'origine du VOR, les VOR de THOMSON-CSF, pour ce qui est des réalisations, sont loin de faire mauvaise figure. Quant aux études nouvelles, en particulier celle du système à faisceaux battants SATRAM de THOMSON-CSF, soutenue à l'origine par le STTA, elles nous ont permis de participer aux comités d'étude du futur système international et d'y apporter des idées qui ne laissent pas d'influencer la définition de ce dernier.

3. Les systèmes à multilatération

3.1. Définition

On sait depuis longtemps que la vitesse de la lumière et des ondes radioélectriques est à peu près constante

dans l'environnement terrestre. Mais jamais la navigation traditionnelle n'avait profité de cette propriété.

Faire le point en mesurant des distances ou des différences de distances entre le mobile et des repères constitue le premier apport fondamentalement original de la radioélectricité ; ce n'est plus là un simple progrès dans les performances. On peut donner aux systèmes de cette famille le nom général des systèmes à multilatération et distinguer parmi eux la variété hyperbolique et la variété circulaire. Les systèmes angle-distance au moyen desquels on obtient le point en mesurant un angle et une distance constituent une transition entre les systèmes que nous examinons maintenant et les systèmes purement angulaires.

3.2. Systèmes hyperboliques

La vitesse des ondes étant connue, on ramène les mesures de longueur à des mesures de déphasage entre deux signaux sinusoïdaux ou à des mesures de décalage temporel entre deux signaux modulés. Pour ce qui est du premier procédé, l'idée d'engendrer un réseau d'hyperboles d'interférence avec des émissions en ondes entretenues est antérieure à 1930. Cela était réalisable grâce à la stabilité de fréquence des émetteurs radioélectriques et à la possibilité de les synchroniser sur un signal pilote, et aussi parce que les longueurs d'ondes hertziennes conduisent à des ordres d'interférence assez faibles et bien en rapport avec les différences de distances à mesurer.

Parmi les nombreux semeurs d'idées de la décennie qui précéda la guerre, notons AICARDI (*O.E.*, janvier 1929), l'allemand HARMS (1930), BIOT (*O.E.*, 1930), HONORÉ (1934), ces deux derniers développant l'idée de balayer l'espace avec un réseau hyperbolique tournant. Mais il fallut attendre la guerre pour voir utiliser à grande échelle le système DECCA. Cette fois encore, la position acquise par le DECCA à la faveur du conflit ne permit pas aux idées françaises de se concrétiser dans des systèmes de navigation d'application universelle. Mais elles donnèrent naissance à d'intéressants systèmes de localisation comme le RADIOMAILLES de GAUDILLÈRE, le RANA d'HONORÉ, et surtout le TORAN de la SERCEL qui continue de faire une belle carrière industrielle en face de nombreux concurrents étrangers.

Les systèmes à ondes longues (10 kHz) ont été depuis quinze ans à l'origine de travaux nombreux qui ont beaucoup fait progresser les connaissances sur la propagation dans cette gamme de fréquences, comme autrefois la radiogoniométrie l'avait fait pour les ondes courtes. L'aboutissement de ces études sera le système OMÉGA à couverture mondiale.

Tous les systèmes précédents utilisent des ondes entretenues et nécessitent de prévoir des moyens pour lever les ambiguïtés de position. Les systèmes à impulsions comme le GEE et les diverses variétés de LORAN, tous fruits de la guerre, ne présentent pas ce défaut.

3.3. Systèmes circulaires

On trouve trace en France d'études relatives à la mesure de la distance entre deux points, suivant le principe de l'aller-retour (mesure à deux voies) dès avant la guerre (FAYARD, *O.E.*, août-septembre 1934). Mais, pour ne pas faillir à la règle, c'est la guerre et les études de radar qu'elle précipita qui donnèrent naissance au DME à 1 000 MHz à impulsions, normalisé par l'OACI et utilisé seul ou associé au VOR ou au TACAN.

Le DME présente l'inconvénient d'être saturable. C'est sans doute une des raisons pour lesquelles on n'a pas vu naître de systèmes circulaires de navigation constitués de plusieurs DME opérant entre mobiles et repères. Mais les systèmes de localisation ne manquent pas et nous devons signaler parmi les réalisations françaises le Trident de THOMSON-CSF.

L'emploi d'ondes entretenues ou de sous-porteuses sinusoïdales nécessite de recourir au multiplexage dans le temps si l'on veut desservir plusieurs mobiles. C'est pourtant vers cette solution qu'on se tourne pour les mesures très précises qu'on exige des systèmes futurs à satellites, comme le système français DIOSCURES décrit dans la 5e partie de cet article et qui est due à M. GIRAUD.

La seule façon d'éviter la saturabilité est de faire des mesures à voie unique en équipant les deux extrémités de la base d'oscillateurs extrêmement stables qui fournissent la référence de temps. Cette idée, lancée par l'américain HOLMES en 1938, n'a pu commencer d'être appliquée que tout récemment dans le Collision Avoidance System (CAS).

4. L'exploitation de la pureté du spectre

La deuxième contribution originale de la radioélectricité à la solution des problèmes de navigation repose sur la pureté des spectres d'émission qu'on sait réaliser. Ces spectres sont assez étroits pour qu'on puisse mettre en évidence l'effet Doppler qui affecte le signal transmis par un émetteur en mouvement radial par rapport au point de réception.

Cette idée est à la base du système de navigation à satellites TRANSIT. On l'applique aussi dans certains systèmes de localisation d'engins. Dans le système DIOSCURES, la mesure de la vitesse permet un fonctionnement en mode dégradé si l'un des satellites tombe en panne.

Dans le cas du radiogoniomètre Doppler et des systèmes qui en dérivent, l'exploitation des variations de phase ou de fréquence est un moyen original de définir une direction qui, tout en laissant au système sa nature angulaire, rompt avec l'exploitation traditionnelle de l'amplitude, héritée des procédés optiques dans lesquels l'attention se portait essentiellement sur le contenu énergétique du signal.

5. Conclusions

Après plus de cinquante années d'évolution, nous nous trouvons en possession d'une gamme considérable de systèmes coopératifs capables de faire face aux exigences diverses de portée, de précision, de commodité d'emploi, etc. que présentent la navigation et la localisation. Mais ces systèmes sont tous les

descendants spirituels de l'humble radiogoniomètre à cadre des premiers temps. Ils sont les fruits d'une utilisation de plus en plus poussée des caractéristiques du signal radioélectrique et d'une connaissance de plus en plus exacte des phénomènes de propagation.

La propagation intervient ici par ses aspects fondamentaux, beaucoup plus qu'en radio-communications, à tel degré que, bien souvent, un signal qui serait encore bon pour communiquer est inutilisable en radionavigation. Il est significatif aussi que les théories de la propagation et, en particulier, celle des ondes très longues, ont vu la plupart de leurs progrès suscités par les besoins de la radionavigation.

Les caractères particuliers du signal et de la propagation ont assuré le triomphe des procédés radioélectriques sur les anciennes méthodes. Ils en sont maintenant le point faible parce qu'on cherche toujours à accroître la précision et l'indépendance vis-à-vis des conditions extérieures. Les systèmes inertiels, qui n'ont même pas besoin du sol comme le radar Doppler de navigation, se lèvent maintenant comme des concurrents redoutables des systèmes de radionavigation.

Nous nous en consolerons en pensant que ces gyroscopes et ces accéléromètres n'eussent rien été sans les moyens de calcul et d'asservissement que l'Electronique a apportés. Les systèmes inertiels entrent ainsi à côté des systèmes radioélectriques dans la grande famille de la Navigation électronique.

Et nous terminerons en adressant une pensée à la mémoire de tous les chercheurs qui ont contribué à des degrés divers aux progrès de la radionavigation et dont les idées ont souvent précédé de loin, les réalisations, tout en nous souvenant que les idées ne prennent généralement toute leur valeur que grâce aux progrès technologiques.

VII

SYSTÈME DE NAVIGATION PAR SATELLITE*

1. Introduction

Par suite de la rotondité de la Terre, il n'est pas possible d'assurer de bonnes liaisons avec des aéronefs en vol sur les vastes étendues océaniques, tout au moins tant que les antennes restent liées au sol. La situation est évidemment changée si l'on peut assurer une émission à partir d'un satellite. A titre d'exemple, la quasi-totalité de la Terre peut être couverte à partir de trois satellites géostationnaires orbitant à 36 000 km de notre planète.

La démonstration technique de la possibilité de réaliser une liaison suivant le schéma Terre-satellite-avion a été faite par la NASA en 1964, en établissant des communications entre un avion de la PAA volant en Asie du Sud-Est et une station de la côte Ouest des Etats-Unis par l'intermédiaire de Syncom III (cette liaison a eu lieu le 22 novembre 1964).

* Ce chapitre a été écrit par M. GIRAUD.

2. Analyse des besoins opérationnels aéronautiques sur les océans

Le développement du trafic aérien commence à créer de sérieuses difficultés pour les vols s'effectuant sur l'Atlantique Nord.

Les moyens de navigation y sont limités, et la seule manière d'y assurer une sécurité suffisante consiste à espacer les aéronefs volant sur une même route et à un même niveau de 20 mn de vol (300 km environ aux vitesses actuelles) où en leur faisant suivre des couloirs parallèles dont les axes sont à plus de 200 km (exactement 120 NM).

Mais le fait de suivre une route parallèle à la route de temps minimal pénalise l'avion qui est obligé de la suivre ; il en est de même si on l'autorise à suivre cette route en lui demandant de voler à un niveau différent du niveau optimal.

Ces pénalisations vont devenir insupportables avec la croissance du nombre de vols envisagée pour les dix prochaines années.

La méthode la plus simple de ramener cette gène à une valeur acceptable consiste à réduire les séparations entre aéronefs. Or, ces séparations sont déduites de la prise en considération des deux facteurs suivants par les équipes de contrôleurs au sol :

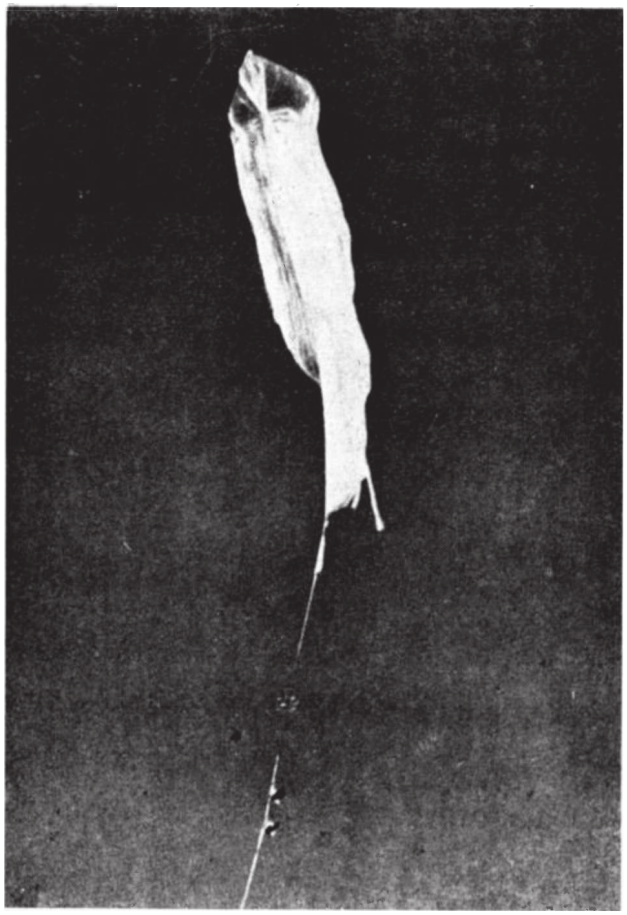
a) l'erreur de position que commet l'équipage au moment où celui-ci communique au sol sa position ;

b) l'erreur d'extrapolation qui provient du fait que l'information donnée par le pilote n'est renouvelée qu'avec une certaine cadence, et qu'entre deux informations successives le contrôleur responsable extrapole la dernière information qu'il détient.

Dans cette dernière erreur, il y a lieu de ne pas négliger le temps nécessaire pour réaliser une communication entre le sol et l'air, car celui-ci imposera une réaction plus ou moins anticipée du contrôleur dans le cas où il détectera un conflit futur possible entre deux aéronefs.

L'analyse de la situation actuelle fait apparaître que les liaisons air-sol qui s'effectuent dans des conditions médiocres en utilisant des fréquences décamétriques (qui portent au-delà de l'horizon) présentent des inconvénients importants : elles nécessitent, pour diverses raisons, l'emploi d'un opérateur au sol, ce qui allonge les délais de transmission des messages entre le contrôleur et l'avion, et ne permettent pas le dialogue. Enfin, elles sont encombrées par les comptes rendus de position qui consistent, pour le pilote, à indiquer régulièrement sa situation (90 % des messages).

Sur ce dernier point, l'emploi d'un satellite, donnant au sol la position des avions par un système automatique question-réponse distinct des canaux de communication apporte déjà une importante amélioration par réduction des messages en phonie. Si de plus la précision de la localisation et la cadence de renouvellement de l'information sont judicieusement choisies, rien n'empêche de réduire les séparations, d'autant plus que la qualité de ces liaisons permet d'envisager des liaisons directes pilote-contrôleur, c'est-à-dire sans perte de temps.



3. Utilisation du satellite comme moyen de localisation

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour permettre la localisation d'une station terrestre avec l'aide d'un satellite. On a été amené à s'orienter vers l'une ou l'autre des trois solutions suivantes :

— Satellites à *défilement* qui, par mesure du temps de propagation satellite-avion-satellite, dispose d'un premier lieu (sphère) de localisation, la mesure de l'effet Doppler donnant un second lieu (cône de révolution), permettant de déduire deux positions possibles sur la sphère d'altitude du mobile. L'ambiguïté sera levée de proche en proche par la connaissance des points précédents. Cette solution a été retenue dans le projet EOLE, qui ne nécessite pas des cadences de renouvellement de l'information élevées (interrogation de ballons passifs donnant des informations météorologiques locales).

Mais cette solution ne peut être retenue dans le cas des avions car, du fait de l'orbite basse occupée par les satellites, c'est un total élevé de satellites qu'il faut mettre en orbite :

— Un satellite géostationnaire utilisant la mesure de l'effet Doppler produit par la vitesse de l'avion, (cône de révolution) d'une part, et une mesure de temps de propagation (sphère), d'autre part.

— Deux satellites géostationnaires (au moins) qui permettent la localisation par la mesure d'un temps de propagation sol-satellite-avion et retour.

Une autre solution consisterait à utiliser le temps de propagation dans un seul sens par l'utilisation des horloges à bord d'avion et dans les stations au sol. Dans chaque cas, pour les besoins de l'aviation, on désire connaître la position des avions au sol par une mesure indépendante de celle de bord, pour s'affranchir des erreurs aberrantes.

C'est le système faisant appel à deux satellites géostationnaires qui a finalement été retenu sur un plan mondial, comme étant celui qui assure la meilleure mesure de localisation.

4. Le projet français Dioscures et les réalisations industrielles

Après une analyse approfondie du problème opérationnel qui était posé, les services français du CNES et du SGAC ont entrepris, dès le début de 1967, une étude théorique d'une solution optimale de satellites aéronautiques pouvant répondre aux besoins internationaux. Le résultat de leurs efforts a été la production d'un projet qui a été baptisé « Dioscures » (du nom des Gemeaux Caster et Pollux, par analogie avec l'utilisation de deux satellites géostationnaires par Océan). Le choix de la fréquence UHF (1 550-1 660 MHz) dans le tronçon satellite-avion-satellite a été assez diversement accueilli au début, car, à l'époque, le choix était orienté vers l'emploi de la VHF. Trois années ont été nécessaires pour convaincre nos partenaires de se rallier à notre choix, et c'est maintenant chose faite.

Pour convaincre, le SGAC a dû faire réaliser des émetteurs-récepteurs de bord (construits par TRT) et une antenne à gain élevé (10 dB) par ELECMA.

Les grandes lignes du projet sont les suivantes :

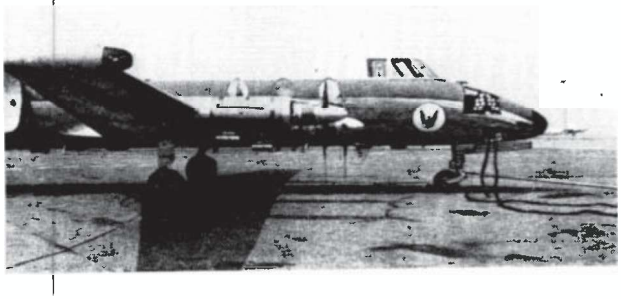
— emploi d'une technique numérique (modulation delta),

— utilisation dans le sens avion-satellite d'un multiple dans le temps (chaque signal est échantillonné à cadence fixe, les échantillons correspondant aux différents signaux étant ensuite entrelacés dans un ordre fixe pour former une trame),

— système localisation dont la cadence est de 3 000 à l'heure (ce qui correspond à localiser un avion donné, une fois toutes les cinq minutes sur l'Atlantique Nord où les points de trafic, pendant la durée de vie de la première génération, ne dépassent pas 250).

Cette localisation est réalisée à l'aide d'un signal de télémétrie envoyé du sol, reçu et retransmis par l'avion, suivant un code pseudo-aléatoire.

Des essais ont été réalisés en 1970 en coopération avec ESRO. Ils ont mis en œuvre les appareillages réalisés en France, montés sur un avion qui communiquait avec la nacelle d'un ballon stratosphérique jouant le rôle du satellite. Ces essais ont permis de



tester l'ensemble, de vérifier le bon fonctionnement des équipements de bord et de mesurer des paramètres sur lesquels les données connues étaient incomplètes (comme le phénomène de trajet multiple).

Les besoins maritimes

La mise en place de satellites destinés à permettre des communications entre des mobiles et des stations fixes peuvent convenir non seulement aux services aéronautiques mais également aux services maritimes. Bien que les besoins de ces derniers soient moins pressants (absence de contrôle de la circulation maritime), il semble que tant pour les communications que pour la navigation (avec renvoi vers le navire de sa position mesurée à terre), les services fournis par les satellites du type de ceux envisagés pour l'aéronautique devraient intéresser la marine.

5. Conclusions

S'agissant de satisfaire avant tout les besoins sur des océans sur lesquels aucun état ne peut se prévaloir d'un droit de souveraineté, il est impossible d'envisager la réalisation d'un projet qui n'aurait pas fait l'objet d'une adoption sur un plan international.

C'est à l'OACI que se poursuit l'examen de cette question, et un groupe d'experts (le groupe ASTRA) a été constitué à cet effet. Il est symptomatique que les Européens, au sein d'ESRO, se soient entendus pour coopérer à la réalisation de ce projet et que les accords se négocient entre européens et américains. Il est probable que des réalisations vont intervenir assez rapidement dans l'avenir.

Les aspects économiques de la question, qui ont commencé à être abordés, montrent que l'emploi de satellites aéronautiques pourraient être bénéficiaires sur le transport aérien d'ici 1980. Si l'on tient compte des délais d'équipement de la flotte aérienne, il apparaît que des décisions doivent être prises dans l'année en cours.

Il est réconfortant de voir que les travaux menés en France se situent dans la voie de la solution qui est en train de se définir. On peut en conclure que l'industrie française devrait être correctement placée dans la compétition qui va naître de la réalisation effective des satellites aéronautiques.

A. PROFIT

Ingénieur en Chef des Télécommunications
Président de la 10e section de la SFER

L'informatique

1. Introduction

Parmi toutes les techniques issues de l'électronique et de la radioélectricité, il en est une, l'informatique, dont le développement a été tout particulièrement rapide : les premières machines sont apparues à la fin de la dernière guerre ; en 1971 la valeur du parc des ordinateurs installés en France est évaluée à 10 milliards de francs et l'on prévoit que ce chiffre atteindra 21 milliards en 1975.

L'originalité de ce domaine ne réside pas seulement dans l'expansion rapide d'un ensemble de techniques de pointe conduisant à des matériels sans cesse plus évolués mais également dans le fait que l'on a vu naître parallèlement à ces matériels un art très élaboré de leur mise en œuvre couramment désigné sous le nom familier de « software ».

L'importance de la « révolution de l'informatique » dépasse le cadre d'un phénomène technique ; il s'agit d'une mutation économique que l'on a souvent comparé non sans raison aux grandes étapes de l'évolution de l'humanité, que ce soit la taille du silex, l'invention de l'imprimerie ou celle de la machine à vapeur. Il n'est pas étonnant dans ces conditions que les gouvernements de nombreux pays aient été sensibilisés et aient décidé une action de promotion énergique en faveur de l'industrie des ordinateurs et de l'utilisation de l'informatique dans les entreprises et les administrations.

2. Petite histoire de l'informatique

A notre époque l'histoire du développement d'une technique ne peut être qu'internationale. Celle de l'informatique n'échappe pas à cette règle, mais les développements industriels ont été, et restent encore aujourd'hui, toujours dominés par un pays, les Etats-Unis. Pourtant sur le plan des idées et des innovations techniques, l'Europe et en particulier la France n'ont pas été absentes. Elles ont même apporté, à certains moments-charnières, des éléments qui sont à l'heure actuelle considérés comme fondamentaux dans les structures des machines.

Parmi les précurseurs du traitement automatique de l'information, il est d'usage de citer PASCAL, dont la première machine arithmétique construite en 1642 faisait les additions, LEIBNIZ qui cinquante ans plus tard introduisait de plus la multiplication, HAHN qui en 1770 réalisait en Allemagne une machine faisant les quatre opérations. Après ces lointains ancêtres, BABBAGE en Angleterre et HOLLERITH aux Etats-Unis ont apporté deux éléments de départ essentiels : le premier introduisait au milieu du XIXe siècle le concept de machine à fonctionnement séquentiel mais devait renoncer à aller jusqu'au bout de sa réalisation faute de disposer d'une technologie suffisante ; le second réalisait en 1881 le premier ensemble mécanographique à carte perforée comportant une perforatrice, une trieuse et une tabulatrice à compteurs mécaniques.

La technique des télécommunications devait être ensuite à l'origine d'une réalisation modeste mais qui contenait en germe deux éléments fondamentaux de l'informatique d'aujourd'hui : le calculateur et la transmission des données. En effet les Télécommunications fournissaient simultanément un problème à résoudre et une technologie de base ; c'est en 1938 que les premiers équipements de calcul à relais firent leur apparition aux Bell Telephone Laboratories pour la résolution de problèmes de calcul en nombres complexes ; il ne s'agissait en fait que d'une calculatrice de bureau câblée, mais la possibilité de modifier le câblage assez commodément la rendait apte à diverses tâches. La possibilité d'utilisation à partir de plusieurs positions d'entrée et même à distance fut démontrée en septembre 1940 devant l'American Mathematical Society réunie au Dartmouth College à Hanover (New-Hampshire), la machine étant installée à New York.

La deuxième guerre mondiale donna une accélération à ces recherches, les besoins en équipement de calcul pour les problèmes balistiques libérant simultanément les crédits et les hommes nécessaires à la réalisation de prototypes de plus en plus perfectionnés : représentation interne des nombres dans un code détecteur d'erreurs, virgule flottante, multiplication par consultation de tables. Une première

série de prototypes naquit ainsi des idées développées aux Bell Telephone Laboratories.

De la fin de la guerre à 1951, date de livraison de la première machine commercialisée, l'UNIVAC I, les tentatives parallèles se multiplient. Il convient de citer entre autres :

— le calculateur MARK I, construit par l'équipe du Professeur Howard AIKEN à l'Université de Harvard en 1944, machine associant les relais électromécaniques et les tubes à vide et conduisant des temps d'opération de 300 ms pour l'addition et de 11 s pour la division ;

— le calculateur ENIAC, de P. ECKERT et W. MAUCHLY, professeur à l'Université de Pensylvanie, premier calculateur à tubes (18 000 tubes), installé vers 1945-1946, avec un temps d'addition de 200 µs ;

— le concept de machine à programme enregistré, introduit juste après la guerre par John VON NEUMANN : il permettait de passer de la notion de machine à calculer à celle d'ordinateur, caractérisée par le fait que la mémoire du système contient sous une même forme les données à traiter et les instructions, ce qui donne la possibilité d'une modification dynamique du programme ;

— l'EDSAC, première machine européenne réalisée en Angleterre à l'Université de Cambridge par M.V. WILKES.

Après ces premières ébauches allait démarrer à partir de 1948 l'ère des machines construites en série à des fins commerciales avec :

— en 1948 l'IBM 603, machine à cartes perforées dotée d'un multiplicateur électronique et programmée par un tableau de connexion ;

— en 1949 l'IBM CPC (Card Programmed Calculator), où les instructions étaient codées sur des cartes perforées ;

— en 1951 l'UNIVAC I, déjà citée, avec mémoire à ligne de retard de deux millions d'éléments binaires et dérouleur de bande magnétique, dont le succès devait se matérialiser par une série de 36 machines.

Les « générations d'ordinateurs » se sont succédées depuis, avec des machines d'abord relativement spécialisées vers le calcul scientifique, la gestion, le temps réel, puis avec des systèmes de plus en plus universels à mesure que leur puissance s'accroissait.

La première génération a été celle des machines à tubes électroniques, mises en œuvre au profit d'un seul et unique utilisateur, en « monoprogrammation ». En dehors des machines déjà citées, les principaux succès ont été l'IBM 650 petite machine scientifique à tambour sortie en 1954, l'IBM 704 et l'IBM 705 qui succédaient en 1956 et 1958 à l'IBM 701 en substituant à sa mémoire à tube électrostatique, sources de problèmes multiples, une mémoire à tores de ferrite.

La seconde génération est celle des années 1960, caractérisée par une technologie entièrement à semiconducteurs et par l'introduction des programmes généraux de support, fournis par le constructeur, permettant l'enchaînement séquentiel automatique des divers travaux et la programmation en langage symbolique (premières versions du langage Fortran, définition de l'Algol et du Cobol). Les constructeurs commencent à se multiplier aux Etats-Unis. A côté d'IBM qui connaît un vif succès avec l'IBM 1620 et l'IBM 7090 en calcul scientifique et avec la série IBM 1400 en gestion (en particulier l'IBM 1401 conçue par un Français Jacques MAISONROUGE qui poursuit aujourd'hui une carrière exceptionnellement brillante au sein de la compagnie), General Electric lance une série d'ordinateurs de commande industrielle, Burroughs et NCR se spécialisent dans la gestion, RCA, dans le calcul scientifique, de même qu'UNIVAC. Trois firmes se forment avec pour seul objectif l'informatique : Scientific Data System et Control Data en calcul scientifique, Digital Equipment spécialisée dans les petits ordinateurs ; elles prennent rapidement une petite part du marché au géant IBM avec des machines telles que les SDS 910, 920 et 930, la CDC 1604 et les PDP 8 qui furent de très belles réussites.

Enfin la troisième génération est celle des gammes compatibles de machines multiprogrammées, du temps partagé et de l'accès à distance ; les circuits intégrés y apparaissent, ainsi que les mémoires de masse. Citons à titre d'exemple la série IBM 360, les grands systèmes tels que le CDC 6600, l'UNIVAC 1108, le General Electric 635 et en Grande-Bretagne la série ICL 1900.

3. La participation française

Parallèlement à cette progression largement dominée par les Etats-Unis, les équipes françaises ne sont pas restées inactives et ont apporté des contributions importantes aux concepts de base qui ont servi à bâtir les structures des machines modernes.

A l'origine, il faut citer les recherches sur la théorie de l'information entreprises à Paris par l'équipe de Louis COUFFIGNAL associé à Léon BRILLOUIN. Mais c'est à la Société d'Electronique et d'Automatisme (SEA) que reviennent les premières réalisations industrielles avec le FIZEAUGRAPHE destiné à l'étude de la trajectographie des fusées pour les champs de tir d'Afrique du Nord.

Dès 1951, la Compagnie des machines Bull présentait un ensemble de calcul électronique à tubes et diodes au germanium associé à un matériel électromécanique classique. Ce matériel qui reçut en 1955 une amélioration décisive avec la connexion d'un tambour magnétique dans le modèle AET, fut réalisé à plus d'un millier d'exemplaires : son succès a été dû à l'utilisation comme moyen d'entrée-sortie de matériel classique qui ne nécessitait qu'une adaptation progressive dans les méthodes de travail des clients. La souplesse d'utilisation était obtenue par un tableau de connexions qui, à la différence des matériels similaires, comportait non un câblage de la machine mais l'affichage d'une suite d'instructions choisies parmi un répertoire de 64 fonctions codées.

En 1952, la SEA réalisait CUBA, Calculateur Universel Binaire de l'Armement, qui fut la première machine universelle de conception française : Mémoire à tambour magnétique, registres à lignes de retard électriques, circuits de calcul à tubes et à

diodes. La hiérarchisation des mémoires, et les transferts d'information par blocs, étaient dans cette machine des concepts nouveaux qui annonçaient déjà les matériels suivants.

La SEA allait justement connaître à partir de 1960 un très beau succès avec le petit calculateur CAB 500 (fig. 1) très habilement organisé et qui constituait une excellente machine de démarrage pour les applications de caractère scientifique.

Au même moment, le Centre National d'Etudes des Télécommunications concevait et réalisait la première machine française entièrement transistorisée de type parallèle, ANTINEA (fig. 2). Il s'agissait d'un prototype s'inscrivant dans le cadre des études de commutation électronique et qui fut suivi à partir de 1963 par trois autres machines plus puissantes baptisées RAMSÈS.

Enfin en 1960 Bull présentait le GAMMA 60 (fig. 3), machine de grande puissance de conception révolutionnaire pour l'époque. Cet ordinateur était la première réalisation commerciale mettant en œuvre une simultanéité de fonctionnement des différentes unités. C'était, au niveau des circuits de la machine, la préfiguration de la multiprogrammation actuelle et, en un certain sens, du multitraitement.

La multiprogrammation était basée sur les unités fonctionnelles qui prenaient en charge chacune un programme, un organe central renvoyant d'une unité à une autre en fonction de cartes de commande placées en tête de chacune des parties du programme.

Les travaux effectués par la Division Militaire d'IBM France pour l'armée de l'air méritent également d'être signalés bien que leur caractère confidentiel n'en ait pas permis la diffusion.

Enfin un certain nombre de machines plus petites mais ayant toutes une originalité profonde faisaient leur apparition parmi les constructeurs français : ordinateurs de gestion « Pallas » (fig. 4) de la SETI, incorporant au niveau du langage machine un procédé d'adressage indirect, petits calculateurs de commande de processus industriels .com-

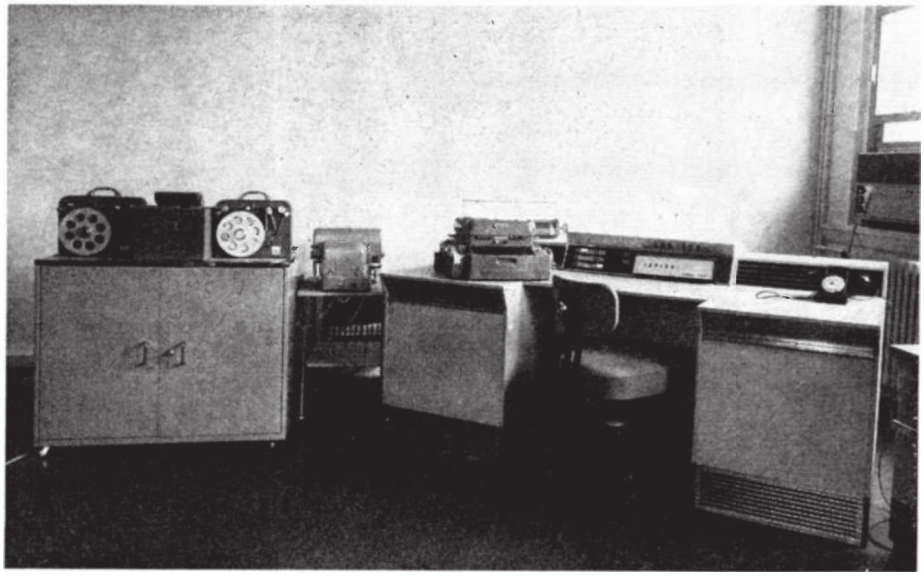


FIG. 1. — La CAB 500, petite machine de bureau mise au point par la SEA.

FIG. 2. — ANTINEA, première machine française transistorisée réalisée au CNET.

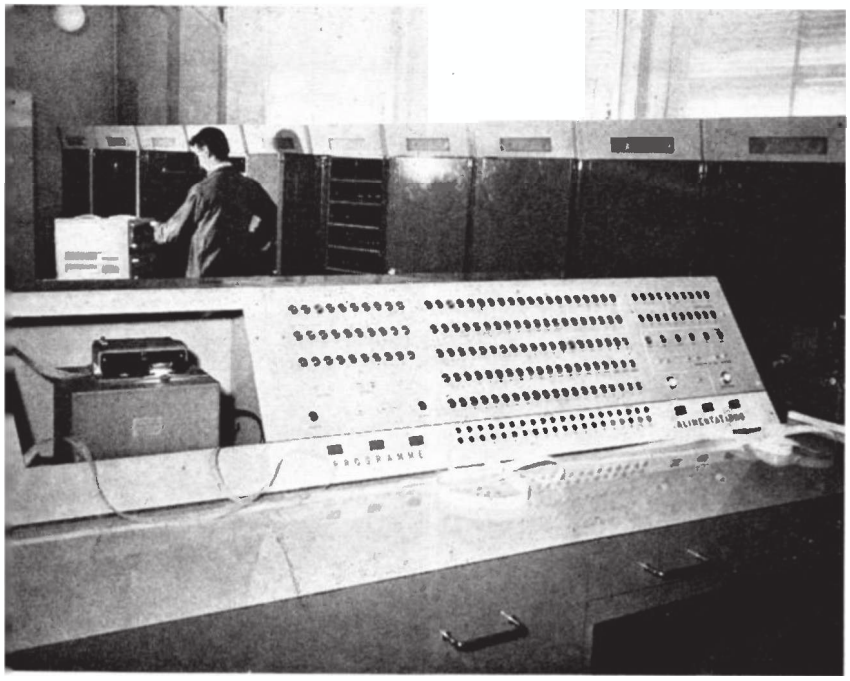
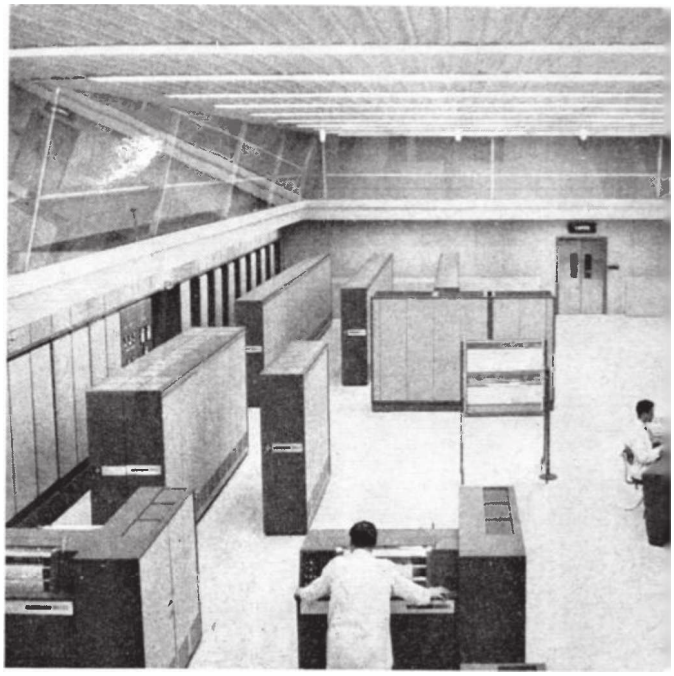


FIG. 3. — Le GAMMA 60, premier grand ensemble de traitement introduisant le principe des simultanéités, commercialisé par la Compagnie des Machines BULL.



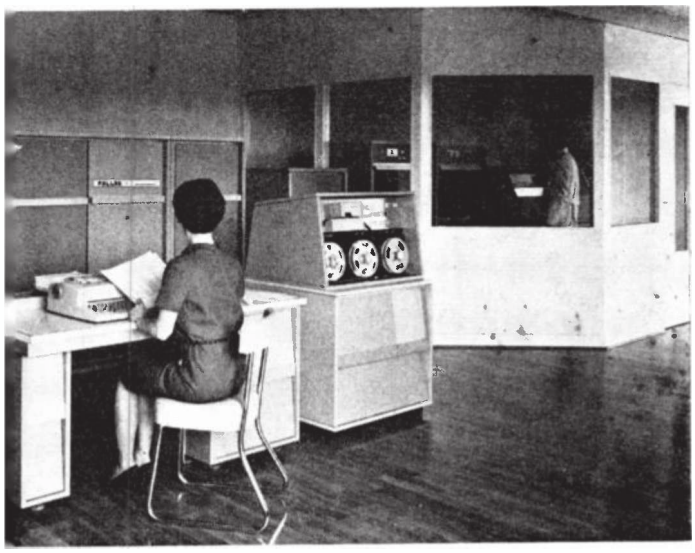


FIG. 4. — La PALLAS, petite machine de gestion issue de la SETI.

FIG. 5. — RME XI, prototype de calculateur micro-programmé mis au point en 1967 au CNET.

me le PSP 77 ou les machines de la Télémécanique et de la Serel, machines de puissances moyenes SEA 3900 et SEA 4000 commercialisées par la SEA autour des années 1963-1967.

Les difficultés industrielles provoquées par la rapide expansion du marché, par le renouvellement rapide des techniques et par la concurrence internationale, devaient amener le Gouvernement Français à entreprendre au milieu de 1966 une action importante destinée simultanément à promouvoir l'usage de l'informatique dans les entreprises et les administrations et à donner à l'industrie nationale la possibilité de tenir sa place sur le marché international. L'idée en avait été lancée dès 1964-1965 par la Délégation Ministérielle à l'Armement et la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique. C'est à la suite d'un débat au Conseil Economique et social et sur un rapport du Commissaire Général au Plan de la décision fut prise. Sous l'impulsion du Délégué de l'Informatique, successivement Robert GALLEY et Maurice ALLÈGRE, la Compagnie Internationale pour l'Informatique a lancé une gamme moderne d'ordinateurs, la gamme IRIS (fig. 5).

L'industrie française enfin s'est intéressée depuis quelques années au développement de miniordinateurs, domaine particulièrement important pour le développement des applications en temps réel de l'informatique.

Après le succès du 10 010 de la CII, la Télémécanique présentait le T2000 et Intertechnique proposait le MULTI 8. Plus récemment LOGABAX vient de lancer le 4200 et la CII le MITRA 15 (fig. 6).

Parallèlement la mise en œuvre des systèmes informatiques nécessitait un effort particulier dans le domaine du software. Ce fut surtout le cas depuis l'apparition de la troisième génération des ordinateurs, c'est-à-dire depuis moins d'une décennie. Les réalisations les plus marquantes ont eu pour objectif de faciliter l'élaboration de systèmes en temps réel : ASTRE pour le contrôle de la navigation aérienne, AUTOL pour la conduite des centrales nucléaires comme Saint-Laurent-des-Eaux, etc. En ce qui concerne les codes de programmation linéaire le produit OPHÉLIE 2, développé par la SEMA sur CONTROL DATA 6600 permet de résoudre des systèmes d'équations à plusieurs centaines d'inconnues.

FIG. 6. — IRIS 50, première machine française du Plan Calcul produite par la CII.

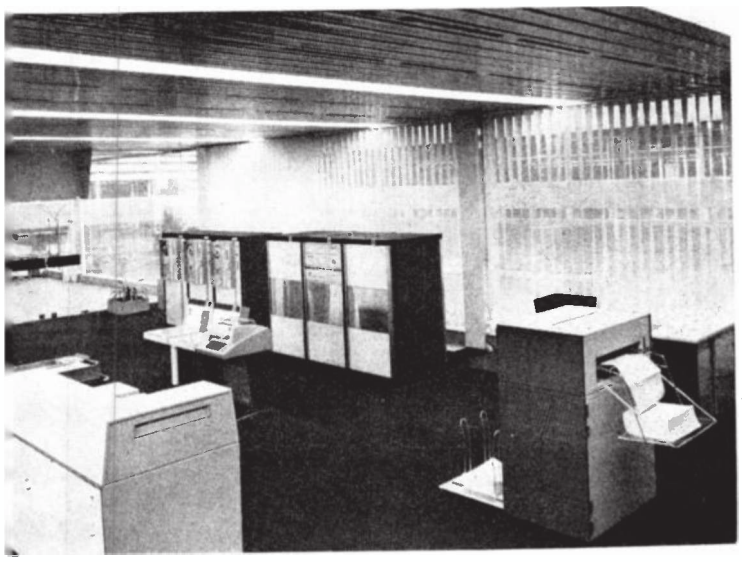
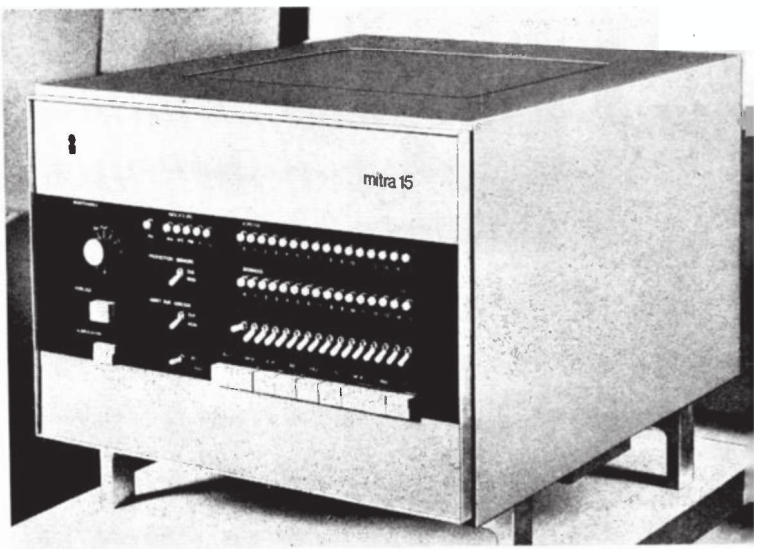


FIG. 7. — MITRA 15, dernière née des machines françaises, annoncée le 10 mai 1971 par la CII.



Pour sa part l'Université de Grenoble poursuit la mise au point d'un système d'interrogation de fichiers de grande souplesse baptisé SOCRATE. Il convient également de citer le programme IMAG 2 destiné à la conception aidée par ordinateur.

4. L'évolution de la technologie

Comment se dessine l'évolution actuelle des ordinateurs ? Au niveau de la conception des matériels eux-mêmes, les ingénieurs ont depuis l'origine poursuivi deux objectifs : l'augmentation de la puissance de calcul disponible et l'abaissement du prix de revient des travaux. Ces deux objectifs ne sont d'ailleurs nullement incompatibles puisqu'une loi économique bien connue, la loi de Grosch veut que pour un stade donné de la technique le prix de revient de l'exécution d'un travail soit d'autant plus faible que le calculateur utilisé est plus puissant, le prix des systèmes augmentant comme la racine carrée de leur puissance plutôt que d'une façon linéaire. Cette progression a été favorisée par un renouvellement rapide et constant des technologies disponibles et par la concurrence acharnée des industriels qui a toujours accéléré la définition et la mise en production de machines de plus en plus brillantes.

Les semiconducteurs ont été à l'origine de l'essor des ordinateurs. A l'heure actuelle les circuits de calcul sont tous réalisés à l'aide de composants intégrés et l'intégration à grande échelle laisse espérer pour la décennie qui s'ouvre une diminution considérable de la taille et du coût des unités centrales.

Un facteur important du développement de l'intégration à grande échelle semble être la mise au point des technologies de type MOS. Basés sur le principe d'une commande en tension, ces dispositifs ont un fonctionnement différent des transistors bipolaires habituels, mais ils ont les gros avantages de nécessiter des procédés de fabrication comportant moins d'opérations et d'avoir des dimensions plus faibles : ces deux facteurs sont favorables à l'intégration à grande échelle puisqu'ils conduisent à réaliser sur une même surface de semiconducteur des composants plus nombreux avec une fiabilité, donc un rendement accru.

Ce progrès a une répercussion importante sur les structures : il rend en effet réalisable des fonctions câblées élaborées donnant au code d'instructions de la machine des possibilités jusqu'à présent réservées à la programmation. Ceci correspondra à un mouvement de reflux intéressant. Le passage du calculateur électromécanique à l'ordinateur programmé, puis l'évolution de ce dernier, correspondait à des structures de plus en plus universelles, adaptables à toutes les tâches au niveau des programmes. L'avènement de l'intégration à grande échelle entraîne un retour à des opérateurs câblés complexes ; ne va-t-on pas jusqu'à parler pour l'avenir de compilateurs câblés !

Il semble toutefois qu'auparavant les semiconducteurs doivent se tailler une place importante dans le domaine des mémoires rapides où on les voit déjà se substituer aux tores de ferrites pour certaines machines de conception récente. Pourtant les mémoires à tores magnétiques n'ont cessé depuis 10 ans d'améliorer leurs possibilités, atteignant maintenant des cycles de quelques centaines de nanosecondes et des capacités allant jusqu'à 10^9 bits ; leur haut degré d'industrialisation les rend extrêmement difficiles à concurrencer du point de vue du prix de revient au bit qui se maintient à quelques dizaines de centimes malgré l'accroissement des vitesses.

Des technologies magnétiques ont fait leur apparition depuis quelques années : mémoires à films minces plans ou cylindriques, mémoires à gaufres, mémoires à circuits magnétiques gravés, mémoires cryogéniques. Des travaux très intéressants avaient été menés sur ces sujets par des laboratoires français, en particulier ceux du CENG, de la CII et de la CSF. Le passage au stade industriel n'a pu malheureusement être entrepris suffisamment tôt pour qu'une place leur soit trouvée avant l'apparition des circuits intégrés.

En ce qui concerne les mémoires de masse, par contre, la compétition reste pour l'instant beaucoup plus ouverte. Après avoir été menacées un moment par les mémoires à feuillets magnétiques, dont le principe incluait des dispositifs mécaniques complexes, donc peu fiables, pour la manipulation individuelle des feuillets, les disques magnétiques se sont imposés comme le dispositif de stockage à grande capacité nécessaire pour contenir les fichiers de tous les grands systèmes. La capacité des unités disponibles commercialement à l'heure actuelle dépasse 10^9 éléments binaires, avec des temps d'accès moyens de quelques dizaines de millisecondes et des débits de plusieurs centaines de milliers de caractères par seconde. Ces performances sont dues à une amélioration constante de la mécanique des têtes et des surfaces magnétiques conduisant à des densités d'inscription sans cesse accrues. Elles rendent difficile le développement de technologies concurrentes qui sont loin d'en être arrivées à des développements industriels importants. Il semble en effet que l'on n'attende plus de succès marqué des mémoires cryogéniques sur lesquels des efforts importants et scientifiquement très intéressants ont été poursuivis pendant plus de dix ans. Parmi les autres technologies magnétiques, des espoirs intéressants subsistent du

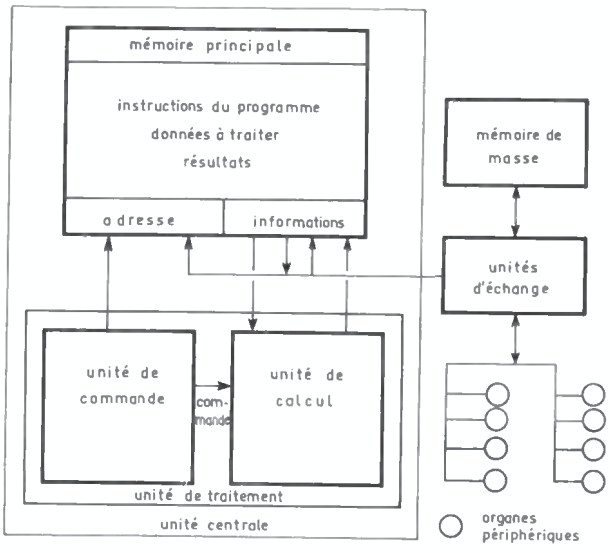


FIG. 8. — Les différents sous-ensembles d'un ordinateur.

côté des mémoires à feuilles de permalloy gravées et du côté des mémoires à bulles fortement poussées par les Bell Telephone Laboratories.

Il semble toutefois qu'une nouvelle génération de mémoires de masse puisse être attendue avec les mémoires à accès optiques : les problèmes de déflexion d'un faisceau laser commencent à trouver des solutions, et, à côté des supports d'information photographiques permanents, apparaissent des supports magnétiques réinscriptibles. On sait réaliser à l'heure actuelle des mémoires électro-optiques sans déplacement mécanique ayant des capacités de l'ordre de 10^8 éléments binaires et l'on vise 10^{12} pour les développements industriels à plus long terme.

En ce qui concerne les organes périphériques des ordinateurs, l'évolution a peut-être été moins spectaculaire que celle de la technologie des unités centrales. Plus qu'une augmentation de performances pour des organes de fonctions données, on a vu apparaître une très grande diversification de ces organes destinée à rendre plus facile l'intégration des machines dans leur milieu d'utilisation.

Bien sûr, les performances des organes périphériques classiques à base électromécanique se sont sensiblement améliorées : les lecteurs de cartes perforées sont passés de 200 à 1 400 cartes par minute, les perforateurs de 100 à 500 cartes par minute, les lecteurs de ruban perforé de 150 à 2 000 caractères par seconde, les imprimantes de 600 à 2 400 lignes par minute, les dérouleurs de bandes magnétiques enfin d'un débit de 10 kilocaractères par seconde à un débit de 160 kilooctets par seconde.

Mais le phénomène beaucoup plus important est l'apparition d'un grand nombre d'appareils destinés à faciliter les échanges d'informations entre l'utilisateur et le centre de calcul :

— dispositifs de lecture optique ou magnétique de caractères, très importants pour les applications de gestion ;

— dispositifs de dialogue tels que machines à écrire électriques et terminaux de visualisation particulièrement nécessaires pour l'utilisation en temps réel, ou en temps partagé, les systèmes de réservation, les banques de données ;

— terminaux lourds, souvent constitués par des ordinateurs de petite taille, permettant l'exploitation à distance par trains ;

— dispositifs de visualisation graphique et traceurs de courbes, permettant le dessin, surtout utiles pour les applications du type conception assistée par ordinateur ;

— dispositifs de réponse vocale permettant à l'ordinateur d'envoyer un message sur le réseau téléphonique en réponse par exemple à l'interrogation venue d'un poste téléphonique à clavier ; ils seront complétés peut-être prochainement par des appareils de reconnaissance vocale permettant le dialogue oral réel ;

— capteurs et coupleurs de tous types nécessaires pour l'interconnexion d'un ordinateur et du processus qu'il contrôle ;

— système de saisie de données à la source travaillant ou non en connexion directe avec l'ordinateur.

L'évolution des technologies s'est accompagnée d'une double progression dans deux domaines extrêmement différents mais aussi importants l'un que l'autre, celui des techniques d'assemblage et celui des structures. Les techniques d'assemblage peuvent a priori paraître manquer d'attrait scientifique ; elles sont pourtant un élément capital qui conditionne, pour une large part, la réussite de l'industrie des ordinateurs. Il ne suffit pas en effet d'avoir de bonnes idées ou de disposer de composants brillants ; le passage au stade industriel suppose que l'on utilise des procédés de construction élaborés conduisant à des machines économiques et fiables. Les principaux progrès dans ce domaine ont porté sur l'étude de la transmission rapide des impulsions courtes à l'intérieur des baies, sur le remplacement des câblages par des circuits imprimés mono puis multicouches avec trous métallisés, sur l'amélioration et la simplification des dispositifs d'alimentation, sur le développement des connexions enroulées et des connecteurs de petite taille, sur l'étude des dispositifs de refroidissement des baies. Ces travaux ont conduit à des équipements beaucoup plus denses et dont le taux de panne était considérablement amélioré ; ceci rendait matériellement possible la construction de machines de plus en plus complexes, comportant des composants et des sous-ensembles de plus en plus nombreux.

5. Le progrès des structures

En effet une fois mises en œuvre les technologies les plus rapides, l'accroissement de la puissance des systèmes passe par un renouvellement de leur structure. Ainsi les machines de petite taille ont longtemps été des machines dans lesquelles le traitement des éléments binaires successifs d'un même mot était effectué en série par un circuit de calcul unique.

Un ordinateur est une machine qui exécute des programmes. Un programme est une suite d'instructions comportant chacune l'indication d'une fonction à effectuer et les adresses des données à traiter ou traitées.

1re phase 1 cycle mémoire	*extraction de l'instruction à traiter ;* l'unité de commande fournit l'adresse de l'instruction courante ; la mémoire interrogée transfère l'instruction dans l'unité de commande.
2e phase 1 ou plusieurs cycles de mémoire	*extraction des opérandes ;* en fonction du libellé de l'instruction, l'unité de commande fournit à la mémoire les adresses du ou des opérandes. Ceux-ci sont transférés dans l'unité de calcul.
3e phase	*calcul ;* le calcul s'exécute, l'unité de commande indiquant à l'unité de calcul la fonction à exécuter.
4e phase 1 cycle mémoire	*retour du résultat en mémoire,* sous le contrôle de l'unité de commande et à partir de l'unité de calcul.
5e phase	*préparation de l'exécution de l'instruction suivante ;* progression d'une unité de l'adresse de l'instruction courante.

— *Passage à l'instruction suivante.*

FIG. 9. — Exemple de déroulement de l'exécution d'une instruction.

A l'opposé, les machines plus grosses ont des organes de calcul fonctionnant en parallèle sur tous les éléments binaires simultanément. Cette notion de parallélisme a été introduite au niveau des sous-ensembles du système. Ainsi le débit de la mémoire principale peut être multiplié par le nombre des accès simultanés que l'on réalise pour extraire plusieurs mots situés dans des blocs différents au cours d'un même cycle de mémoire (fig. 10). Pour exploiter

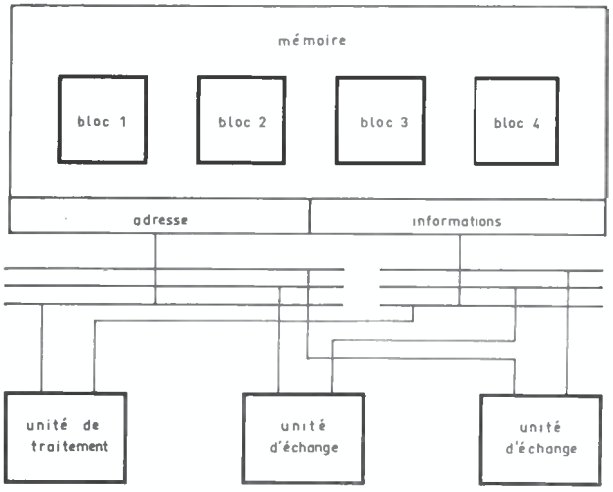


FIG. 10. — Les simultanéités dans un grand système.

de façon efficace une telle mémoire, on est amené à lui raccorder à côté de l'unité de traitement de nombreuses unités d'échange travaillant en même temps que l'unité centrale et gérant indépendamment de l'exécution du programme les transferts d'informations entre la mémoire rapide, d'une part, les unités périphériques et les mémoires de masse, d'autre part.

Pour augmenter la puissance de traitement de l'unité centrale proprement dite, on bute sur le fait que l'exécution de chacune des instructions nécessite plusieurs appels successifs à la mémoire. Pour introduire des simultanéités à ce niveau, on est amené à intercaler entre l'unité de commande et la mémoire une « unité d'anticipation » qui se charge de préparer à l'avance toutes les informations à extraire de la mémoire nécessaires à l'exécution de chacune des instructions.

Les instructions ou les données étant susceptibles d'être modifiées par le programme entre le moment de leur entrée dans l'unité d'anticipation et le moment effectif de leur utilisation, de nombreuses précautions doivent être prises pour que le traitement s'exécute correctement dans tous les cas, ce qui conduit à des unités de commande extrêmement complexes et coûteuses.

Depuis quelques années, une notion plus intéressante et apparemment plus efficace a été introduite : c'est celle d'antémémoire (fig. 11). Elle intercale entre la mémoire principale et l'unité de traitement une petite mémoire rapide dans laquelle sont transférées les informations et les instructions au fur et à mesure des besoins et avant leur utilisation. Comme l'antémémoire est 100 ou 1 000 fois plus petite que la mémoire principale, elle peut être réalisée de façon économiquement acceptable avec une rapidité 10 fois plus grande. L'unité centrale qui y puise informations et instructions peut donc aller beaucoup plus vite. L'amélioration obtenue serait évidemment nulle si, à chaque fois qu'un mot est nécessaire à l'unité centrale, il devait être extrait successivement des deux étages de mémoires. En fait, dans une tranche donnée de programme, un nombre limité de zones de mémoire est efficacement utilisé et ce sont celles-ci que l'on transfère temporairement dans l'antémémoire. Avec un algorithme de transfert judicieusement choisi, on a montré par simulation que dans les cas les plus défavorables, la puissance de traitement obtenue dépassait toujours la moitié de la puissance qu'aurait une machine de référence théorique équipée d'une mémoire unique ayant la capacité de la mémoire principale et la rapidité de l'antémémoire. C'est donc là une structure extrêmement prometteuse dont le succès actuel est parfaitement compréhensible.

En matière de simultanéité au niveau du traitement, on a proposé également des structures multitraitement (fig. 12) dans lesquelles plusieurs unités de traitement se partagent l'accès à un même jeu de blocs de mémoire et coopèrent à l'exécution du même ensemble de programmes. Les problèmes posés par ce genre d'organisation ne sont pas très difficiles à résoudre au stade de la réalisation des matériels, mais ils sont beaucoup plus complexes au niveau des systèmes de programmation en raison des interférences possibles entre les travaux exécutés simultanément.

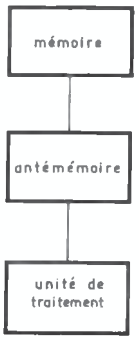


FIG. 11. — Structure à antémémoire

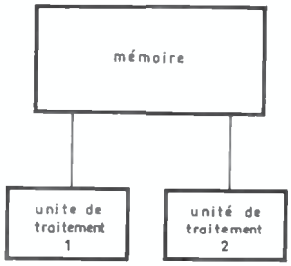


FIG. 12. — Configuration multitraitement

Une autre voie de parallélisme explorée depuis plusieurs années à l'Université d'Illinois est celle qui correspond à la structure d'Illiac IV. Il s'agit d'une énorme machine comportant 64 unités de calcul travaillant en parallèles — il y en avait même 256 dans le projet initial — et exécutant simultanément le même programme sur des données différentes sous la direction d'une unité de commande unique. On conçoit qu'une telle structure soit bien adaptée au traitement de tableaux matriciels de données mais il en découle que tous les algorithmes de calcul doivent être entièrement repensés en fonction de cette nouvelle structure. Il ne semble pas pour l'ins-

tant que de telles idées doivent conduire prochainement à des réalisations commerciales.

Chez les constructeurs, le renouvellement rapide des structures posait entre autres un problème difficile et coûteux pour le développement des supports de programmation. Ce problème se retrouvait d'ailleurs au niveau de l'utilisateur sous une forme légèrement différente puisque le capital accumulé des programmes d'utilisation risquait d'être gravement entamé par tout renouvellement de matériel. Depuis l'apparition de la troisième génération, on trouve sur le marché des gammes de matériels compatibles. Ainsi le code d'instructions au niveau du langage de la machine est le même pour les ordinateurs de toute puissance issus d'un même constructeur. De plus, ce code d'instructions tend à se conserver, éventuellement en s'élargissant, lorsque de nouvelles machines plus modernes viennent s'ajouter au catalogue existant. Tout programme établi pour l'une des machines de la gamme est capable de passer sur n'importe laquelle des autres si l'on fait abstraction du volume des mémoires nécessaires et du temps d'exécution. On conçoit facilement les nombreux avantages que l'on peut en retirer.

Toutefois cette conception risque de rendre moins économiques les petites machines pour lesquelles la réalisation de fonctions complexes câblées ne s'impose que du fait de la compatibilité.

L'une des solutions de ce problème est l'adoption de structures microprogrammées qui présentent, par ailleurs, des avantages considérables du fait de la souplesse extrêmement grande qu'elles confèrent aux structures de machines ; de ce fait, elles sont en voie d'adoption quasi générale pour les machines petites et moyennes (fig. 13).

Le principe consiste à définir pour le langage de la machine deux niveaux d'instructions différents :

— les instructions proprement dites à l'aide desquelles sont bâtis les programmes ; elles ne correspondent pas à des fonctions câblées dans la machine ; ce sont ces instructions qui permettent le codage du programme en mémoire ;

— les micro-instructions, correspondant à des fonctions câblées ; leur assemblage sous forme de microprogrammes sert à traduire les différentes instructions ; les microprogrammes ainsi définis sont enregistrés dans une mémoire rapide spéciale de microprogrammation, souvent semi-permanente.

L'exécution d'une instruction du programme suppose à chaque fois la consultation du microprogramme associé. Le gain par rapport à une solution où on ne disposerait que du seul niveau des micro-instructions pour coder le programme provient des points suivants :

— le programme codé en instructions est plus court, donc moins encombrant ;

— l'exécution des micro-instructions est beaucoup plus rapide que ne le serait celle des instructions, car les micro-instructions sont issues de la mémoire de microprogrammation qui peut être très rapide ; de plus, les appels de données en mémoire se font au niveau de l'instruction et sont communs à toutes les micro-instructions d'un même programme, ce qui accélère considérablement le rythme d'exécution.

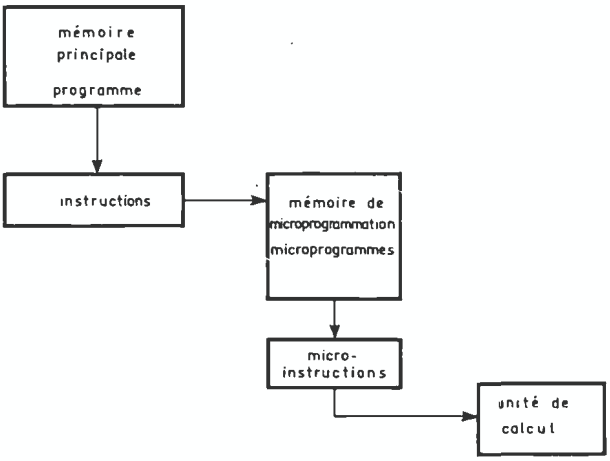


FIG. 13. — Structure microprogrammée

En modifiant le contenu de la mémoire de microprogrammation, on peut très aisément changer le code d'instruction d'une machine, ce qui permet, au niveau de la fabrication, l'adaptation d'un même produit à différentes catégories d'utilisateurs, et au niveau de l'utilisateur, l'adaptation dynamique du programme au problème traité.

Signalons que les structures microprogrammées semblent avoir actuellement un très grand succès dans le domaine difficile des miniordinateurs : il s'agit de petites machines destinées à être incorporées dans des systèmes complexes pour exécuter un certain nombre de tâches pour lesquelles la souplesse du programme enregistré est précieuse : collecte de données, dialogue avec des utilisateurs distants, conduite de processus, etc.

Le marché des machines de cette catégorie est un marché difficile mais en pleine expansion car les modèles sont extrêmement nombreux et les prix très bas.

6. Les supports de programmation

La technique de mise en œuvre des ordinateurs a subi une évolution singulière depuis les premiers modèles. Cette évolution s'est traduite à la fois dans l'organisation des centres de calcul et dans le développement des moyens de programmation. A l'origine, l'utilisateur avait devant lui une machine à laquelle il devait adapter son langage : les programmes devaient être rédigés directement dans le code de la machine avec seulement une table d'équivalence entre un code mnémonique, permettant de désigner les instructions et les adresses et la forme purement binaire du programme en mémoire ; l'utilisateur, installé au pupitre de la machine, mettait son programme au point pas à pas et en dirigeait lui-même l'exécution.

On a rapidement constaté que le calculateur lui-même pouvait apporter une aide à ces diverses tâches. Cela a conduit à développer un certain nombre de programmes généraux destinés à venir compléter le matériel pour en améliorer l'exploitation :

— programmes d'ordres initiaux destinés à améliorer le dialogue utilisateur-calculateur et à permettre l'entrée dans le système de nouveaux programmes ;

— programmes d'assemblage autorisant l'emploi d'expressions plus synthétiques que les instructions machines proprement dites pour rédiger le programme ;

— programme de chargement prenant en compte automatiquement la gestion des adresses de la mémoire.

A ce point d'élaboration, deux notions fondamentales allaient apparaître dans le domaine des supports de programmation : celle de langage symbolique et celle de moniteur (fig. 14 et 15).

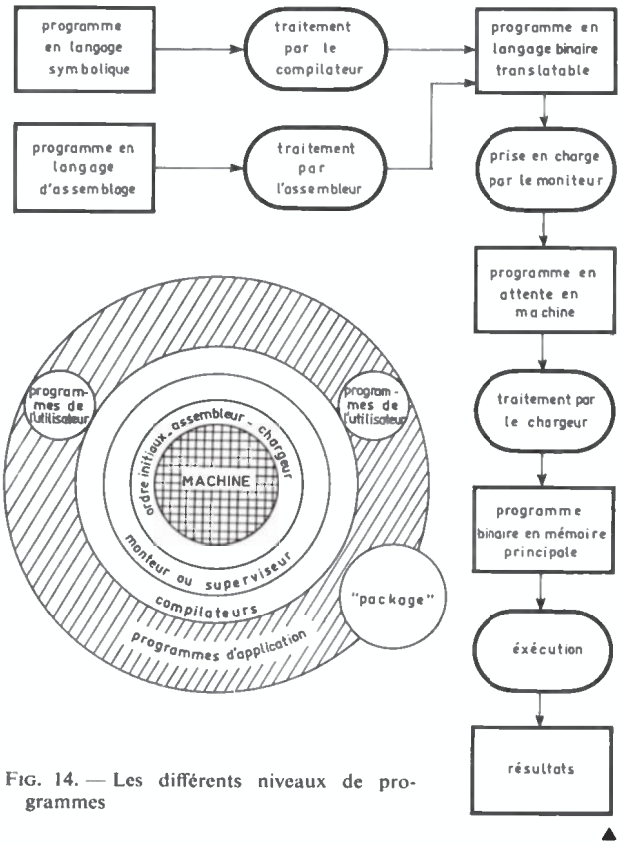


FIG. 14. — Les différents niveaux de programmes

FIG. 15. — Enchaînement des différents niveaux de programmes

A mesure que les machines devenaient de plus en plus grosses et de plus en plus coûteuses, il devenait impossible de maintenir le dialogue utilisateur-machine. La trop grande disparité entre l'échelle des temps de l'homme et de la machine ne pouvait en effet qu'entraîner un gaspillage de l'ordinateur au cours d'un tel dialogue. Les ordinateurs se sont alors trouvés isolés dans des centres de calcul, véritables temples de la machine auxquels n'avaient accès que le personnel d'exploitation proprement dit. L'utilisateur, exclus de cet univers, ne communiquait avec l'ordinateur qu'au moyen de paquets de cartes et de résultats imprimés. Pour améliorer le rendement de la machine, un programme, le moniteur, assurait l'enchaînement des travaux.

Parallèlement, comme un public de plus en plus nombreux devait avoir accès à l'informatique, il importait de faciliter au maximum les tâches de programmation, jusque-là affaire de spécialistes. C'est ainsi que naquirent un certain nombre de langages symboliques indépendants de l'ordinateur sur lequel le travail devait être exécuté et facilement mis en œuvre après un apprentissage relativement court. Le programme rédigé par l'utilisateur dans un tel langage est d'abord traité par la machine à l'aide d'un programme dit « compilateur » qui le traduit dans le langage particulier de la machine choisie. On connaît le succès qu'ont eu des langages tels que le Fortran, qui a connu, et connaît encore de multiples versions et variantes malgré les normalisations, tel que l'Algol plus mathématique, tel que le Cobol, destiné aux applications de gestion. La floraison des langages symboliques a toujours oscillé entre deux pôles extrêmes : la normalisation de langages universels uniques aptes à toutes les applications, nécessairement un peu lourds mais en nombre limité, tel que PL1, ou la multiplication de langages spécialisés, bien adaptés à une catégorie de travaux mais n'ayant chacun qu'un nombre limité d'adeptes ; ce sont par exemple les langages de simulation, les langages pour le temps réel, les langages pour la manipulation d'expressions algébriques.

7. Les modes de mise en œuvre

L'élaboration de plus en plus grande des moniteurs a donné naissance à la multiprogrammation. C'est une technique qui vise à optimaliser le rendement global d'un système composé de nombreux sous-ensembles en faisant prendre en compte à un même instant plusieurs programmes par le moniteur. Ces programmes doivent coexister dans la mémoire de la machine et utilisent à tour de rôle les différentes unités au mieux des disponibilités. Le moniteur superpose ainsi dans le temps les transferts d'entrée ou de sortie de plusieurs programmes utilisant des organes périphériques ou des mémoires de masse distinctes en simultanéité avec l'exécution de tranches d'autres programmes précédemment appelés et préparés (fig. 16).

Mais, avec un tel système, l'utilisateur a perdu le dialogue avec la machine, qui permettait une mise au point rapide des programmes. Aussi a-t-on cherché à rétablir ce dialogue en mettant en œuvre des procédés de partage de temps (fig. 17). En effet, en partageant le temps du système central entre de nombreux utilisateurs réunis simultanément autour de l'ordinateur et dialoguant à l'aide de pupitre d'interrogation, on peut globalement obtenir une bonne utilisation des moyens mis en œuvre. Le programme moniteur, devenu superviseur de multiprogrammation et de temps partagé, fait passer l'activité de l'unité centrale successivement d'un programme à un autre avec une cadence d'échantillonnage suffisamment lente pour qu'un travail appréciable soit exécuté à chaque passage et suffisamment rapide pour que chacun des utilisateurs ait l'impression de disposer, à lui tout seul, de la totalité du système. Les algorithmes de répartition

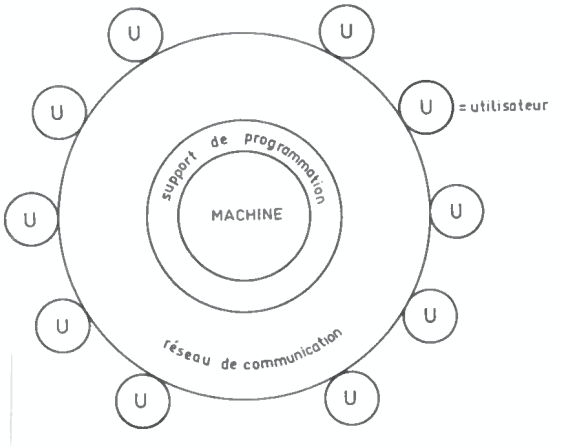


FIG. 16. — Les différents niveaux d'accès à un système

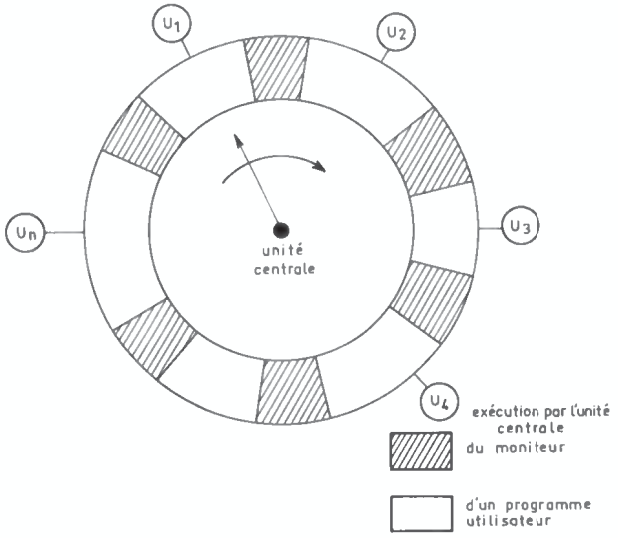


FIG. 17. — Principe du temps partagé

de ressources dans un tel système sont difficiles à étudier de façon que le rendement global soit bon. Mais en dehors du dialogue, l'utilisateur trouve de nombreux avantages à ce mode d'exploitation :

— possibilité de disposer de moyens très puissants certainement très au-dessus des moyens normaux dont il pourrait disposer, avec une dépense identique consacrée à un système autonome ;

— possibilité d'accès à des bibliothèques de programmes ;

— possibilité de mise en œuvre de nombreux langages ;

— possibilité d'entraide entre utilisateurs ;

— possibilité d'accès à des fichiers communs.

Ayant organisé autour du système de traitement une certaine population d'utilisateurs, il est normal d'envisager leur raccordement non plus en local mais à travers un réseau de télécommunications. Ceci a été rendu possible, parce que simultanément au progrès de l'informatique, les télécommunications ont développé les moyens nécessaires à l'acheminement à travers les réseaux des informations destinées aux ordinateurs. Les réseaux télégraphiques ou téléphoniques peuvent maintenant véhiculer des informations à des vitesses variant de 200 à 9 600 bits par seconde ; des voies spécialisées peuvent acheminer des débits beaucoup plus considérables : 72 000 bits par seconde sur un groupe primaire de 12 voies téléphoniques, 240 000 sur un groupe secondaire de 60 voies. La mutation prochaine du réseau des télécommunications déclenchée par l'introduction de techniques numériques en transmission et en commutation ouvre des possibilités encore plus grandes en fournissant un train binaire à 64 000 bits par seconde pour chaque voie téléphonique et un train binaire à 2,048 Mbits par seconde pour le multiplex du premier ordre. Dans tous les pays, des plans sont en voie d'élaboration pour la mise en place progressive d'ici une dizaine d'années de réseaux spécialisés de données. Des conversations sont en cours pour l'établissement de normes internationales pour ces différents services ; partout en Europe l'expansion du marché des transmissions de données est considérable au point que le parc des terminaux double chaque année. Ainsi tout est prêt pour l'association de plus en plus étroite de l'informatique et des télécommunications au point qu'en 1969, à l'issue d'un congrès international, le Ministre des PTT a pu dire : « L'informatique de l'avenir sera à l'évidence la téléinformatique. »

Enfin un phénomène important mérite de retenir un instant notre attention en matière de mise en œuvre des systèmes informatiques : c'est la part croissante de l'utilisation des mémoires de masse. Un système important ne se conçoit plus sans une mémoire de masse de grande taille. S'il s'agit d'un système de gestion, il s'organise autour d'un fichier central ; s'il s'agit de calcul scientifique, la bibliothèque des programmes est installée en permanence dans la mémoire de masse. De même tous les grands systèmes exploités en temps réel, tels que les systèmes de réservation de places, associent la gestion d'un fichier en mémoire de masse à un réseau de communication interconnectant un grand nombre de terminaux.

8. Les programmes d'application

Tous les programmes dont nous avons parlé jusqu'à présent font partie du « support de programmation » général fourni par le constructeur d'ordinateur en même temps que la machine. On conçoit que la charge représentée par le développement de tous ces programmes soit considérable et qu'elle tende à dépasser partiellement celle que représente l'étude des matériels proprement dits (fig. 18).

La tâche de l'utilisateur en matière de programmation n'est pas moindre. Elle est toutefois beaucoup plus diverse, trop diverse même. En effet, on constate trop souvent que chaque utilisateur réinvente pour son propre compte des programmes de traitement tout à fait équivalents à ce que d'autres ont déjà effectué.

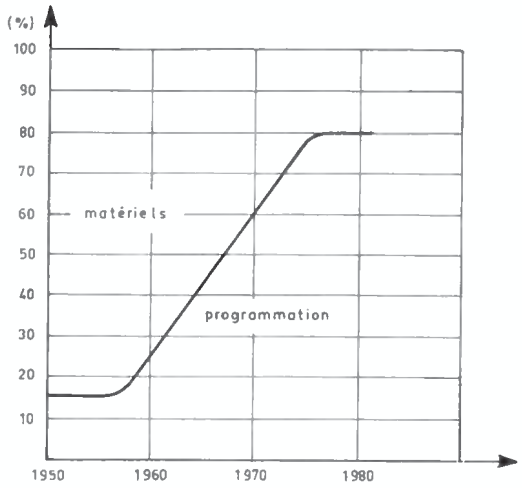


FIG. 18. — Répartition des dépenses de développement du matériel et des programmes.

Pour éviter ces duplications d'efforts, des sociétés de service apparaissent, de plus en plus nombreuses dans les grands pays industrialisés. Leur place dans l'économie du pays prend, de jour en jour, plus d'importance. Elles mettent à la disposition de l'utilisateur leurs connaissances et leur puissance de travail pour le conseiller ou pour effectuer à sa place l'établissement et la mise au point des programmes relatifs à son application. De plus en plus, elles lancent sur le marché des programmes généraux d'application — les « packages » — qui s'adaptent très rapidement au cas particulier de chaque client par la fixation d'un certain nombre de paramètres déterminant d'une part les caractéristiques du problème à traiter, d'autre part les éléments définissant le système utilisé.

L'explosion du marché de ce qu'il est maintenant convenu d'appeler le « software » peut être caractérisée par deux chiffres : les dépenses annuelles effectuées aux Etats-Unis à la fois par les constructeurs d'ordinateurs, les utilisateurs et les sociétés de service, sont passées de 500 millions de dollars en 1960 à près de deux milliards de dollars en 1970, la part des sociétés indépendantes passant en même temps de 1 à 8 %.

9. Conclusion

Parvenu au terme de ce tour d'horizon très général de l'informatique, il est difficile de ne pas dire un mot de l'évolution du domaine des applications. Le sujet mériterait à lui seul un développement particulier ; nous nous contenterons ici de citer quelques tendances générales.

Au départ, les calculateurs électroniques traitaient quelques problèmes scientifiques et prenaient la suite des machines mécanographiques. Aujourd'hui l'informatique est l'auxiliaire indispensable de la vie économique, scientifique, technique. Son impact ne peut plus être chiffré et son rôle est devenu indispensable. On est passé de la comptabilité mécanique à la gestion intégrée des entreprises industrielles et commerciales, regroupant dans une base de données commune, accessible à tous les services, l'ensemble des informations concourant au fonctionnement de l'ensemble ; la production, le marketing, la distribution, les services commerciaux, les bureaux de prospective puisent dans cette base de données en même temps qu'ils l'alimentent.

Il est des secteurs où le développement de l'informatique a toujours été en avance : les banques, les assurances, les administrations, les compagnies aériennes, la recherche scientifique et technique. Il en est d'autres où le besoin naît rapidement, c'est le cas du secteur commercial, de la vente par correspondance, des magasins à succursales multiples. On pressent que certains domaines vont connaître une mutation fondamentale dans la décennie à venir, grâce à l'informatique : c'est le cas de l'enseignement et du recyclage, c'est le cas aussi de la gestion médicale, comme de la régulation des communications de tous les types. La généralisation des banques de données et leur interconnexion dans des réseaux d'ordinateurs devraient, d'ici quelques années, rendre disponible une foule d'informations utiles pourtant peu diffusées jusqu'à présent.

L'impact sur la vie individuelle peut être espéré ; il peut être aussi redouté. Le dossier médical individuel, la société sans chèques, ont des avantages indéniables. Mais seule une adaptation précise de la réglementation juridique et administrative pourra rendre leur mise en œuvre supportable d'un point de vue social.

Ainsi, que nous le voulions ou non, notre existence toute entière est désormais liée à l'usage de l'informatique ; il nous appartiendra de savoir en faire bon usage, mais n'était-ce pas déjà le cas de l'écriture ou de la machine à vapeur et n'est-ce pas nécessairement le cas de toute innovation scientifique ou technique ?

Remerciements

Je dois remercier ici tout particulièrement mon ami Guy MAINGUENAUD, Ingénieur des Télécommunications au CNET qui a bien voulu se charger de rassembler pour moi un certain nombre des éléments nécessaires à la rédaction de cet article.

J. GASCHI J. GROSVALET G. PEYRACHE

Chef du Département Qualité et Fiabilité RTC - La Radiotechnique-Compelec

Directeur de Recherches à la Cie Française Thomson-CSF

Délégué Général composants Electron. FNIE
Président de la 5e section de la SFER

Les composants électroniques

I. BREF HISTORIQUE

En 1970 l'industrie française des composants électroniques a réalisé un chiffre d'affaires voisin de 3 MF hors taxes ; elle emploie près de 50 000 ouvriers. Son activité, bien que minime par rapport à l'ensemble des activités nationales (0,34 % du produit national brut), conditionne fortement le développement d'un secteur considéré par tous comme vital dans l'économie de demain. Les exemples sont suffisamment nombreux, les perspectives promises suffisamment riches dans ce numéro spécial du Cinquantenaire de l'Onde Electrique *pour que tous les lecteurs soient convaincus du bienfondé des espoirs qui sont mis dans l'électronique et donc du rôle des composants. L'industrie française des composants électroniques se penche sur son passé, analyse les grandes évolutions techniques qui l'ont marquée et cherche à pressentir les grandes tendances de demain. Amélioration des caractéristiques, plus spécialement dans les fréquences élevées, miniaturisation, fiabilité sont chaque année plus tangibles au cours de la grande confrontation internationale qu'est le Salon des Composants Electroniques de Paris. Celui de 1971 les a confirmées, il a aussi laissé entrevoir les perspectives nouvelles que pourront offrir l'optoélectronique ; la cryogénie, etc. mais cela est un autre chapitre.*

1. Les composants électroniques avant l'électronique

L'absence de documentation précise rend difficile la détermination des dates essentielles dans la préhistoire des composants, c'est-à-dire dans la période *ante* TSF. Toutefois, dès 1745, la bouteille de Leyde n'était-elle pas le premier condensateur ?

En 1800, la pile de Volta, en 1821 la thermoélectricité, en 1823 les piles thermoélectriques dues à Seebeck furent les premiers des générateurs de courant continu. Inductances et transformateurs dès 1832, relais électromagnétiques pour le télégraphe en 1837-1838 ont été les ancêtres de générations encore aujourd'hui vivaces bien que constestées parfois. Il est, dans cette revue historique, intéressant de noter que, si FARADAY a mis au point les thermistances vers 1850, il a fallu attendre près d'un siècle avant qu'un développement industriel important leur soit consacré.

Les condensateurs semblent avoir assez continûment préoccupé les physiciens du siècle passé, puisque successivement ont vu le jour les condensateurs à lames parallèles (1853) — inventés en France par FIZEAU — les condensateurs électrolytiques au platine (1860), les condensateurs bobinés au papier (1876) et finalement les condensateurs électrolytiques à électrodes en aluminium (1896) et ceux au papier métallisé (1900). Les résistances, elles, semblent avoir moins passionné les inventeurs puisque seule l'invention des résistances agglomérées, par BRADLEY, en 1885 peut être citée. Par ailleurs, dès 1883 étaient connues les propriétés du sélénium.

Mais, sans aucun doute possible, l'an 0 de notre siècle a ouvert l'ère de la TSF, puis de l'électronique. En 1901, le premier détecteur à galène a été découvert pas BOSE aux USA et en 1904, FLEMING en Angleterre inventait le tube à deux électrodes mettant ainsi en application en même temps que WEHNELT en Allemagne, l'effet Edison pour le redressement. Dès 1907, avec l'apparition de la lampe à trois électrodes de LEE DE FOREST, la radiotélégraphie devient commercialement viable. A cette époque, il n'existait pas, à proprement parler, d'industrie des composants, car chaque constructeur réalisait lui-même de façon artisanale la plupart des composants

dont il avait besoin, parfois même les tubes. Ce n'est que pendant la première guerre mondiale que, en France, en Angleterre, en Allemagne, sont apparues des fabrications industrielles de tubes électroniques, démarrées cependant dès 1913 aux Etats-Unis.

2. L'ère de la TSF

En 1915, sur décision du Colonel FERRIÉ, le Service des Transmissions des Armées Françaises adopte pour la réception et l'émission de faible puissance la lampe que le Professeur H. ABRAHAM venait de mettre au point avec l'aide des usines Grammont, la célèbre lampe TM (Télégraphie Militaire) produite par les Usines Grammont de Lyon, et celle produite par l'équipe de M. A. PETIT dans l'usine d'Ivry de la Compagnie Générale d'Electricité. Plus de 100 000 lampes TM furent fabriquées en 1916 et plus de 300 000 en 1918.

L'industrie française des **tubes électroniques** était née. Elle était même à cette époque une des toutes premières.

Au cours de la même période, les Etablissements H. Pilon développèrent des lampes d'émission de puissance (20 W).

La guerre finie, les lampes et matériels conçus en vue des seules communications militaires sont très rapidement transposés et adaptés à des usages commerciaux orientés vers des communications à l'échelle internationale et transcontinentale. Parallèlement naissait, à l'usage du public, l'audition radiodiffusée.

Un immense marché potentiel s'ouvre alors aux industriels : E. Girardeau à la Société Française Radio Electrique (SFR) créée en 1910 et quelques années plus tard H. DAMELET à la tête de la Radiotechnique, y joueront un rôle déterminant.

Dans les tubes électroniques ou d'émission, on assiste au développement d'une industrie dont on s'aperçoit très vite qu'elle exige des investissements importants. Si un certain nombre d'entreprises trop petites n'ont qu'une existence éphémère, des groupes puissants se constituent.

Dans les **composants passifs,** ce n'est qu'après 1920, que l'industrie est née et vers 1930 que se sont affirmés les premiers fabricants indépendants auprès desquels s'approvisionnaient les industries de postes ou d'équipements radio, militaires ou civils. Les résistances d'alors au carbone aggloméré (baguettes de silundum) pressé dans des tubes munis d'embouts furent produites en grandes quantités. On les utilisait comme charge d'anode ou comme résistance de fuite de grille. Les condensateurs au papier étaient essentiellement tubulaires disposés dans des tubes souvent en verre, fermés par des embouts métalliques. Les condensateurs au mica sur support en matière moulée étaient aussi très répandus. Les condensateurs électrolytiques étaient essentiellement à électrolytique liquide en boîtiers cylindriques. C'est en 1927 que les premières résistances à couche carbone déposé furent fabriquées par Grammont.

A l'époque, les câblages étaient effectués en fils nus rigides, parfois à section rectangulaire, les fils coudés à angle droit, leurs extrémités étant façonnées en œillets à la pince à bec rond.

Jusqu'à la seconde guerre mondiale, l'essentiel des progrès techniques a été réalisé dans le domaine des tubes :

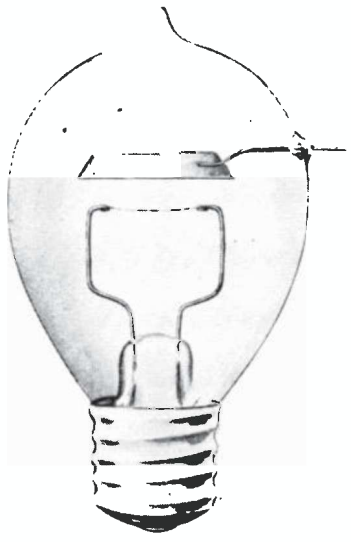
— tubes de réception,

— tubes d'émission,

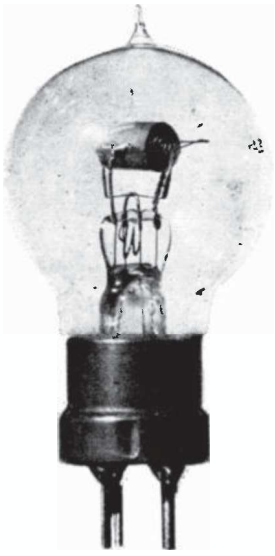
— tubes hyperfréquences et magnétrons,

— tubes convertisseurs (signal-image, image-signal).

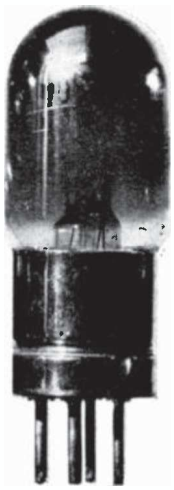
Ils ont donné lieu à de passionnantes recherches, de la part de nombreuses équipes. Une énumération des grands noms de l'époque serait fastidieuse et ne saurait être exhaustive. Qu'il soit permis toutefois, de citer ici quelques dates qui ont marqué en France le développement de ces techniques :



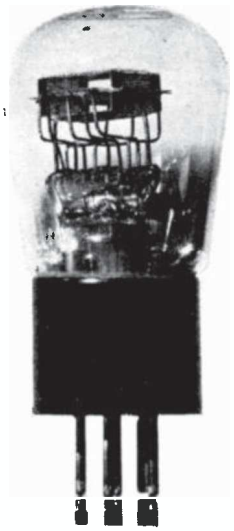
Diode d'étude de Fleming.



Le tube TM de 1916.



La « radiomicro » de 1927 à filament de 0,06 A.



Tube bigrille de 1930.

— *1923 :* Développement à la Radiotechnique par H. NOZIÈRES d'un tube de réception brigille ;

— *1926 :* Réalisation d'un tube à champ de freinage par M. PIERRET, assistant de C. GUTTON à la Faculté des Sciences de Nancy, utilisé pour des expériences de transmission en ondes décimétriques ;

— *1928 :* Mise au point par le LCT (Laboratoire Central des Télécommunications) de tubes d'émission ; nombreux brevets de G.C. CLAVIER et H. LE BOITEUX, notamment dans le domaine des ondes centimétriques ;

— *1929 :* Brevet fondamental de CHEVALIER (CdC) sur la concentration par lentille électrostatique dont le principe conditionne le fonctionnement de tous les tubes cathodiques fabriqués aujourd'hui ;

— *1930-1933 :* Etude systématique des magnétrons dont M. PONTE, H. GUTTON et BERLINE établissent la théorie à la suite des travaux de WARNECKE.

Un historique détaillé de toute cette épopée des tubes électroniques, figure dans la Revue *Industries Electroniques* n° 15.

Puis survint la seconde guerre mondiale. L'industrie française des composants électroniques tente de survivre au milieu de mille difficultés techniques et autres, c'est néanmoins le 9 mai 1940 que M. PONTE remettait aux laboratoires anglais de Wembley des exemplaires d'un magnétron à cathode à oxydes et à segments résonnants, dont la technique était alors en avance sur le plan mondial. Mais pendant quatre ans l'inactivité forcée de la plus grande partie des entreprises pesa lourdement sur notre industrie.

3. De 1945 à hier

Après 1945, la remise en marche de l'industrie se fit lentement : les matières premières faisaient défaut, les connaissances techniques accumulées par nos alliés anglais et américains étaient difficiles à transférer sinon à connaître. Une mission d'industriels français en Angleterre, dès 1945, leur révéla l'ampleur des problèmes qu'ils avaient à résoudre pour se remettre à niveau.

Les impératifs militaires avaient amené les industriels d'outre Atlantique, et par contrecoup les Anglais, à développer un secteur important, celui des équipements électroniques professionnels essentiellement militaires. Ils avaient dû pour cela accroître les sévérités imposées aux équipements et par conséquent aux composants. Impératifs de tenues mécaniques et climatiques, définissant une qualité qui ne se justifiait guère auparavant, les avaient conduits à établir tout un système de normalisation et de contrôles sévères avec lesquels nous n'étions guère familiers.

Cependant, après une remise en place des moyens de production et des équipes de recherche, en quelques années, l'industrie des composants retrouve une vitalité prodigieuse. Le marché professionnel et le marché grand public conjugent leurs demandes. Tous deux se développent avec un taux de croissance remarquable et les composants doivent suivre, souvent précéder.

Lorsqu'on essaie de décrire l'évolution technologique pendant cette période, trois faits marquants apparaissent qui ont conditionné fortement l'ensemble de l'électronique. Dans le secteur Grand Public, c'est l'avènement de la télévision qui entraîna pour l'industrie des tubes cathodiques un développement prodigieux relayé de nos jours par celui du tube couleur, par ailleurs, c'est la découverte en 1948 par Shockley, Bardeen et Brattain de l'effet transferrésistor « transistor » sur un cristal de germanium, puis en 1959 la mise au point des circuits intégrés.

Depuis 1950, l'électronique est placée sous le signe du **semiconducteur.** Etapes essentielles en France de cette phase nouvelle :

Dès *1948*, P. AIGRAIN et C. DUGAS ont constitué la première équipe universitaire travaillant sur les semiconducteurs :

— *1955 :* J. GROSVALET prend un brevet sur un dispositif germanium à effet de champ : l'Alcatron,

— *1956 :* LTT met au point la fabrication de monocristaux de germanium et celle de transistors bipolaires tirés,

— *1958 :* S. TESZNER au CNET met au point le Tecnetron, transistor à effet de champ hyperfréquence au germanium,

— *1960 :* J. GROSVALET prend un brevet de base sur les structures métal-oxyde-semiconducteur (statistor devenu le MOS),

— *1960 :* G. DUMAS à la SILEC industrialise les thyristors suivant des techniques originales.

Les mutations technologiques consécutives aux dernières découvertes ne sont pas encore aujourd'hui totalement assumées, elles comportent de telles promesses, elles ouvrent de telles perspectives de débouchés nouveaux pour l'électronique que bien des rêves sont permis.

Pour rester dans le domaine des composants actifs, il est légitime toutefois de mentionner les améliorations et les innovations apparues dans les **tubes.** Voici quelques dates :

— *1947 :* R. WARNECKE réalise le premier amplificateur à onde progressive magnétron ;

— *1947-1948 :* Début en France des fabrications industrielles de tubes cathodiques de télévision (RTC, lampes FOTOS), ou spéciaux (SFR - Radio Industrie) ;

— *1950 :* C. BEURTHERET, à la Thomson-Houston, découvre une technique originale de refroidissement des tubes d'émission et invente le vapotron ;

— *1951 :* B. EPSZTEIN invente à la CSF l'oscillateur carcinotron ;

— *1952 :* R. ZWOBADA à Radio-Industrie met au point les premiers magnétrons et klystrons millimétriques ;

— *1954 :* Nombreux progrès français dans les tubes à image à mémoire électrostatique, sous l'impulsion de Ch. DUFOUR aux laboratoires CSF de Corbeville ;

— *1955-58 :* R. METIVIER développe à CFTH un klystron de 30 MW donnant 20 kW en bande S et place les dispositifs qui suivirent en tête des réalisations mondiales ;

— *1956 :* P. GUENARD développe des klystrons large bande, après avoir réalisé les premiers klystrons de grande puissance ;

— *1961 :* le LEP met au point un tube analyseur d'images infrarouges, puis en 1963, un tube cathodique permettant de visualiser des phénomènes transitoires de 1/10 de nanoseconde.

— La même année, H de FRANCE réalise le tube couleur à grille.

Dans le même temps, les **composants passifs** évoluent mais de façon plus continue, moins révolutionnaire. De nouveaux diélectriques se confirment pour les condensateurs, les épaisseurs des plastiques (mylar ou polycarbonate) utilisés atteignent 2 µm, le tantale avec électrolyte solide acquiert droit de cité pour son insensibilité à la température.

Les résistances à films déposés supplantent peu à peu les résistances agglomérées, isolées, la couche de carbone s'efface devant la couche métallique ou d'oxyde métallique, les résistances bobinées conservent néanmoins leur domaine d'application, par suite de l'utilisation d'émaux fonctionnant à haute température.

Les potentiomètres à piste de carbone déposé sont remplacés désormais par des modèles à piste moulée. Le potentiomètre bobiné, amenant une relation linéaire étroite entre angle de rotation et valeur de la résistance, commence à céder la place à la piste plastique qui autorise un pouvoir séparateur plus élevé car non limité par les considérations de bobinage.

Les bobinages ont connu une évolution importante avec l'avènement des ferrites qui constituent aujourd'hui l'essentiel des noyaux magnétiques utilisés en télécommunication, ou dans les bobinages de radio et de télévision.

Dans les ferrites, on distingue les ferrites doux pour noyaux magnétiques ou d'inductances et de transformateurs, les ferrites durs pour aimants permanents, les ferrites pour hyperfréquences et les ferrites à cycle d'hystérésis rectangulaire. Ces derniers ont eu, avec le développement de l'informatique, un essor prodigieux ; les tores pour mémoires deviennent de plus en plus petits ($\varnothing$ = 0,4 mm) et de plus en plus utilisés en attendant l'avènement des dispositifs mémoire à semiconducteurs.

Les éléments de connexions voient leur marché croître avec celui des circuits imprimés. Ces derniers se sont perfectionnés, leurs températures limites de fonctionnement ont été augmentées (verre à base de résine époxyde). La précision des dessins et des perçages due à l'utilisation de machines automatiques permet la réalisation de circuits multicouches, imposés par le développement des circuits intégrés.

Deux décisions gouvernementales prises après la seconde guerre mondiale ont eu sur les composants électroniques français des répercussions considérables par les conséquences qu'elles ont amenées.

• La première en date fut, en 1945, la décision des autorités militaires et de la profession d'accomplir un effort vigoureux et important pour améliorer la qualité des composants entrant dans les matériels militaires — les matériels aéronautiques surtout posaient alors des problèmes de sécurité de fonctionnement (on ne disait pas encore de fiabilité !).

Ce fut là l'origine de l'ensemble des travaux de normalisation et d'assurance de la qualité des composants, élaborés dans le cadre du CCTU (Comité de Coordination des Télécommunications de l'Union Française) devenu depuis le CCT et dont on connaît l'impact sur le développement des composants professionnels français. Le CNET, dès 1952, avec la création de sa Division Pièces Détachées et Tubes ainsi que les services techniques des armées devaient jouer un rôle important dans cet effort de redressement. Le LCIE (Laboratoire Central des Industries Electriques), dont la Section Composants date de 1954, devait y apporter un soutien appréciable avec ses moyens d'essais mis à disposition pour les homologations, les contrôles, ou les investigations.

• La seconde qui, elle, se fit attendre un peu plus longtemps, fut la création, fin novembre 1958, d'un Comité consultatif de la Recherche scientifique et technique et la nomination d'un Délégué général de la Recherche scientifique et technique. C'est en août 1960 que ce Comité fut chargé d'étudier les problèmes que posait l'insertion dans le IV^e Plan, des programmes de recherche scientifique et technique.

On connaît, depuis, le rôle qu'a joué la DGRST, l'importance des actions concertées qu'elle a lancées et plus spécialement celle de l'action concertée électronique.

La part active qu'ont pris dans cette action l'I.C. BERTRAIS et M. M. CHAPPEY aux côtés de l'actuel délégué M. P. AIGRAIN sont pour beaucoup dans le fait que l'industrie des composants électroniques française se situe aujourd'hui parmi les toutes premières et qu'elle conserve, malgré les difficultés inhérentes à une situation en perpétuelle évolution, malgré l'âpreté de la compétition internationale dominée par les Etats-Unis pour les produits les plus sophistiqués et par l'Extrême-Orient pour les produits de grande diffusion, une compétitivité technique et commerciale de tout premier ordre.

II. ÉTAT ACTUEL ET TENDANCES

1. Introduction

Dans un récent congrès international, l'auteur d'un papier de synthèse sur la situation des semiconducteurs faisait remarquer que si l'industrie de l'automobile avait subi une évolution performance/prix semblable depuis 15 ans, nous roulerions à la vitesse du son dans des machines coûtant quelques centaines de dollars, voire quelques dizaines. Cette observation imagée, illustre bien le développement

véritablement explosif que l'apparition des semiconducteurs a initié dans le domaine des composants électroniques.

Elle rend compte de la difficulté qu'il y a à apprécier l'état actuel d'une situation encore essentiellement évolutive. Ceci d'autant plus que l'application des propriétés des semiconducteurs a stimulé des recherches fondamentales et appliquées dans d'autres domaines de la physique du solide, suggérant des solutions concurrentes dans le domaine des mémoires, de la microélectronique hyperfréquence, de l'optoélectronique, etc.

C'est là une tendance contraire à toute stabilisation. Et, par exemple, on voit mal quel choix industriel définitif pourrait être fait aujourd'hui parmi tous les phénomènes possibles et déjà étudiés pour réaliser des mémoires (mémoires à semiconducteurs bipolaires, MOS, MNOS, magnétiques, optiques, magnéto-optiques, etc.).

Mais il y a une tendance contraire imposée par les réalités économiques. « Faire mieux » c'est-à-dire mettre en œuvre des effets nouveaux, augmenter les performances, ne correspond pas toujours au besoin réel. Dès lors apparaît la nécessité de « faire moins cher » c'est-à-dire d'augmenter les rendements de fabrication, de mieux maîtriser les technologies connues.

Il est certain que ces deux tendances coexistent présentement dans l'industrie des composants, selon le domaine d'application envisagé.

2. Récents progrès réalisés

Il est d'abord intéressant de regarder rapidement à quel niveau de performances en sont arrivés les dispositifs et circuits utilisant les classiques propriétés de la jonction *pn*, complétées par l'effet transistor dans le silicium.

Les diodes silicium permettent la réalisation de redresseurs pour des tensions de 1 000 V à 4 000 V. En détection hyperfréquence, les technologies actuelles permettent des dimensions donnant accès à la gamme des quelques dizaines de gigahertz.

Pour les transistors, les tensions de 400 V à 1 000 V avec des courants dans la gamme de 10 à 20 A sont devenus possibles. Ils permettent de commuter des courants de la dizaine d'ampères en quelques centaines de nanosecondes. Leur gamme de fréquence s'est étendue jusqu'à 2 à 3 GHz avec des puissances de l'ordre de 100 mW.

La technologie des circuits intégrés bipolaires a progressivement surmonté les limitations apportées par les couplages parasites. Les circuits logiques ECL ont des temps de propagation de l'ordre de 2 à 3 ns avec des dissipations de l'ordre de 50 mW par porte. Le niveau d'intégration s'accroît régulièrement.

Le simple transistor entre également en concurrence avec bien d'autres solutions comme point-mémoire. Au récent congrès de l'IEEE (Solid State Circuits) à Philadelphie, les chercheurs de Bell ont, en effet, décrit un point mémoire à un seul transistor (base non connectée) avec un temps lecture-écriture inférieur à 10 ns, sur une surface de silicium de 6 μm^2 environ.

Ces performances ont été acquises sans qu'il soit fait appel à de nouveaux phénomènes, mais en perfectionnant l'ensemble des technologies connues : précision des masques photographiques, diffusions et épitaxies contrôlées et reproductibles en faible épaisseur (inférieures au µm).

Les progrès du niveau d'intégration sont dus à la fois à l'automatisation du dessin des masques, aidée par le CAO (*) (modèles) et par un meilleur contrôle du matériau et des processus de fabrication.

2.1. Dispositifs MOS et diodes Schottky

Bénéficiant de ces progrès, de nouveaux effets sont devenus utilisables.

Les dispositifs MOS ont fait une entrée en masse dans le domaine des circuits intégrés. En logique, ils permettent des consommations de l'ordre de 0,5 mW par porte avec des temps de propagation de l'ordre de 300 ns. Les circuits à MOS complémentaires permettent d'améliorer encore ces performances : consommation de 50 à 60 nW par porte et par kilohertz, avec des fréquences d'horloge de l'ordre de 5 MHz.

Les mémoires MOS de divers types (accès aléatoire RAM ou mortes ROM) sont commercialisées jusqu'à 2 048 bits par puce de silicium. Les consommations sont de l'ordre de 50 µW par bit avec des temps d'accès de l'ordre de 400 ns.

Le contact Schottky entre un métal et un semiconducteur, longtemps limité à la réalisation de diodes, a permis d'augmenter les performances de certains dispositifs : notamment les dispositifs à effet de champ. Les effets de champ à grille Schottky au silicium atteignent des fréquences de 12 à 15 GHz, avec l'arseniure de gallium 30 GHz.

L'introduction des diodes Schottky aluminium-silicium dans les circuits intégrés TTL permet un bond vers les performances des ECL (temps de propagation 2,5 ns).

2.2. Domaine des micro-ondes

Le domaine des hyperfréquences a vu naître de nouveaux composants.

Les diodes à avalanche et les diodes IMPATT sont utilisées en générateur de micro-ondes. Les diodes IMPATT en silicium permettent de générer quelques 50 à 70 mW à 100 GHz avec quelques % de rendement, 200 mW en bande Ka avec 3 ou 4 % de rendement. Avec les diodes IMPATT en AsGa, on peut générer 4 W continus en bande C et X.

Les générateurs à effet Gunn en arséniure de gallium permettent d'obtenir de 200 à 500 mW continus en bande X.

(*) Conception assistée par ordinateur.

2.3. Circuits hybrides et microélectronique hyperfréquence

Ce rapide tableau, résumé des performances actuelles des dispositifs ou circuits actifs en semiconducteurs, doit être complété par quelques remarques concernant les composants passifs. Ceux-ci aussi ont bénéficié des progrès technologiques : résistances, condensateurs (céramique, polyesters, électrolytiques solides au tantale) ont également évolué en précision, en performances, en fiabilité.

Il est intéressant notamment de noter l'effort fait pour fournir, en composants adaptés, cette autre partie de la microélectronique que constituent les circuits hybrides. Ces derniers ont conduit également au développement industriel d'une nouvelle forme de présentation des composants actifs permettant leur assemblage dans des micro systèmes : montages cératabs, flip-chip, micro poutres (beam - lead).

Ce développement pose un problème intéressant sur la notion même de composant électronique. Les circuits intégrés avaient déjà introduit la notion de « composant complexe ». Il ne s'agissait plus de ces éléments passifs ou actifs individualisés comme des objets indépendants.

Les éléments pour circuits hybrides et encore plus les éléments de la microélectronique hyperfréquence présentent un tout autre caractère.

Ils sont conçus et réalisés en fonction de l'ensemble plus complexe dans lequel ils vont entrer. Leurs dimensions, leur technologie, leur présentation, leurs performances mêmes y sont adaptés étroitement. Dans beaucoup de cas, leur fabrication doit être intégrée à la fabrication même des systèmes. Leur vie individuelle est courte comme celle des radicaux libres dans une réaction chimique complexe. S'ils peuvent être encore considérés comme des composants (au sens où un objectif est un composant d'un microscope), ils ne peuvent certainement plus être considérés comme des « pièces détachées » et le Salon annuel de Paris a eu raison d'en tenir compte en changeant sa dénomination.

Il est probable que la tendance au développement de ce type de composant ira en s'augmentant, notamment dans les systèmes mettant en jeu de nouveaux effets physiques (optique, magnétisme, effet Josephson, etc.).

3. Faire mieux et plus fiable

Après ce panorama rapide et incomplet des éléments actuellement fabriqués, est-il possible de dégager quelques tendances pour le futur développement de l'industrie électronique ? Allons-nous voir ce développement subir d'autres discontinuités brutales comme le passage du germanium au silicium, comme le passage des éléments discrets aux circuits intégrés ? Ou bien avons-nous atteint une période de stabilisation avec des technologies figées et un taux de novation réduit ? Il semble qu'il n'existe de réponse valable que selon le domaine d'application envisagé, selon la façon dont les solutions actuelles trouvent leur utilisation.

Il est certain qu'une première tendance consistera à « mieux faire » ce que l'on sait déjà réaliser. Il convient de préciser ce que signifie « mieux faire ».

D'abord maîtriser les processus connus (épitaxie diffusion, photolithographie) pour améliorer les rendements de production aussi bien dans un but économique que pour aller le plus loin possible en niveau d'intégration.

Ensuite pousser au maximum les performances possibles. Ce qui peut signifier l'apparition de nouvelles techniques dans les processus de fabrication (perfectionnement des machines de fabrication des masques, masquage électronique, implantation d'ions, usinage ionique, etc.).

Enfin améliorer la fiabilité : il est probable que dans cette direction nous verrons naître de nouveaux processus d'interconnexions et surtout d'encapsulation des dispositifs et circuits classiques.

Dans tout le domaine des redresseurs, transistors, circuits intégrés linéaires et logiques en silicium, il s'agira probablement d'un progrès dans la stabilité avec des choix de développement réalisant le meilleur compromis : prix - performance - fiabilité pour une application donnée.

4. Perspectives d'avenir

Mais il est probable qu'il existe de nouveaux domaines d'application des composants de l'électronique où le foisonnement de l'innovation est loin d'être terminé.

Prenons, par exemple, le problème évoqué au début des mémoires d'ordinateurs. Même dans le simple domaine du silicium la question est loin d'être figée. Les mémoires bipolaires n'ont pas soulevé l'enthousiasme. Les mémoires à MOS (500 μm^2 par point mémoire) ont suscité plus d'intérêt. Mais, chaque année, de nouveaux principes sont proposés : point mémoire à deux diodes (*pn* et Schottky), puis à un seul transistor (6 μm^2 par cellule). En parallèle, se développent des dispositifs à transfert de charge en surface du silicium. Si nous ajoutons à cela les systèmes à « bulles » magnétiques dans les orthoferrites ou les grenats (de 10^{16} à 10^8 bits par $inch^2$ selon les auteurs), les mémoires optiques par holographie, etc. il serait bien osé de prédire aujourd'hui quelle solution prédominera, ou même d'affirmer qu'une autre n'apparaîtra pas dans les mois à venir.

Mais cet exemple permet de percevoir une grande différence entre la situation actuelle et celle des premières années du développement des composants en semiconducteurs. Tous les types de transistors imaginés (alliés, tirés, drifts, alliés-diffusés, micro-alliés, etc.) on fait l'objet d'une fabrication industrielle plus ou moins importante. La concurrence économique s'est chargée de trier parmi les innovations. Il est certain qu'il n'en sera pas de même de toutes les idées qui naissent aujourd'hui dans les services d'études et recherches. Seules verront le jour industriellement celles qui présentent le meilleur

compromis prix-performance-fiabilité pour telle ou telle application.

De nombreux domaines de l'électronique sont aujourd'hui à la recherche de nouveaux composants au sens large : l'enregistrement, la conversion des images, la visualisation, l'électronique médicale, les transducteurs, etc. Les semiconducteurs joueront un rôle dans ces composants mais aussi de nouveaux matériaux (ceux aux propriétés optiques non linéaires, magnétiques, ferroélectriques et autres).

D'autres branches de la physique des solides, et même de la physique en général, seront mises en œuvre (ondes de surface et d'interface, émission de lumière cohérente ou non, diffusivité des cristaux liquides, holographie, propriétés des matériaux amorphes, etc.).

En raison de tous ces besoins, il est probable que l'innovation dans le domaine des composants électroniques est loin d'avoir atteint son point de saturation.

III. LA FIABILITÉ ET LES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

1. Introduction

Si l'on considère ce domaine relativement nouveau qu'est la fiabilité, on ne peut manquer d'être frappé par l'importance croissante qu'a prise cette discipline en particulier dans l'industrie électronique. Cette importance s'est développée parallèlement à la croissance de cette industrie, elle-même profondément influencée par les progrès et les mutations dans le domaine des composants électroniques que nous avons connus les trente dernières années.

Dans un monde qui devient de plus en plus dépendant d'équipements automatiques complexes, visant à remplacer l'homme là où les caractères spécifiques de son intelligence et de son efficacité ne nécessitent pas son intervention permanente, il est bien évident que la fiabilité de ces équipements devient un paramètre fondamental. Plus est grande notre dépendance vis-à-vis de l'automaticité, plus sont lourdes les conséquences qu'entraîne la défaillance d'un équipement. Aussi peut-on penser qu'un des facteurs de limitation des progrès futurs, dans de nombreux domaines, sera la complexité qu'il sera possible d'atteindre, compte tenu de l'état de nos connaissances dans le domaine de la fiabilité.

Cette recherche constante vers la réalisation d'équipements de plus en plus fiables, a entraîné une recherche parallèle d'amélioration des composants dont nous voudrions donner un aperçu dans les lignes qui suivent.

2. La période des tubes à vide

On peut situer vers 1930 la naissance de la fabrication en série des composants, avec des méthodes de production qui nous paraîtraient peut-être un peu simplistes aujourd'hui, mais qui ne cessèrent de se perfectionner au cours des années. Ces composants étaient essentiellement destinés à la réalisation de postes de radiodiffusion. Et si l'on excepte quelques applications spéciales comme la téléphonie, les spécifications utilisées étaient relativement peu sévères, la tenue dans le temps ou à des contraintes extérieures, pratiquement ignorée.

Le besoin d'équipements, donc de composants fiables, fut ressenti pour la première fois par les Alliés durant la deuxième guerre mondiale. C'est à cette époque que furent développées les méthodes de contrôle statistique, qui furent considérées alors comme un facteur important pour empêcher que la fiabilité inhérente à la conception d'un dispositif ne soit dégradée au cours de la fabrication par des processus incontrôlés.

Ces idées firent leur apparition en France après la Libération, lorsque les fabricants eurent à faire face aux nombreux problèmes que soulevait le redémarrage de leur industrie. Ils furent confrontés également avec le démarrage d'un nouveau marché, celui de la télévision où des exigences nouvelles et des tolérances plus sévères, furent demandées à leurs produits.

Toutefois ce fut vers les années cinquante que se posa un problème nouveau avec les tubes utilisés par l'Armée de l'Air. A ces tubes, il était demandé d'assurer un fonctionnement correct dans des conditions d'environnement variées, telles que chocs et vibrations. Ces tubes furent connus sous le nom de tubes de sécurité, le mot fiabilité n'était pas encore inventé. Sous l'impulsion du STTA, des études furent entreprises par les divers fabricants, études qui conduisirent à repenser la conception des tubes et surtout introduisirent une nouvelle philosophie au niveau de la fabrication, pouvant être schématisée comme suit :

— grands soins lors des opérations d'assemblage ;

— analyse détaillée des diverses phases de la fabrication et des modes opératoires ;

— vérification de chaque pièce détachée ainsi que des assemblages terminés ;

— essais en fonctionnement de 48 à 100 heures pour éliminer les pièces douteuses.

L'ensemble de ces actions avait pour but d'assurer une homogénéité et une stabilité de production telles, que les essais finals effectués par prélèvement soient significatifs de la qualité de l'ensemble.

Il convient de mentionner que les connaissances acquises à travers cette expérience bénéficièrent à l'ensemble des tubes, quel que soit l'usage auquel ils étaient destinés.

3. L'apparition des semiconducteurs

Mais le démarrage de l'industrie des semiconducteurs, qui ouvrait de nouvelles et larges perspectives

au développement de l'électronique, allait donner à la fiabilité une dimension nouvelle. Il suffit, pour mesurer l'évolution du problème, de citer quelques chiffres relatifs au nombre de composants utilisés dans les équipements électroniques d'un avion :

En 1936, l'équipement de bord comptait de 200 à 300 composants dont 25 à 30 tubes, en 1956, l'équipement d'un gros bombardier possédait quelques milliers de composants dont au moins 2 000 tubes, en 1971, l'équipement d'un bombardier géant est constitué de près d'une centaine de milliers de composants.

La fiabilité, qui reçut son nom de baptême français en 1960, allait devenir très vite, durant la dernière décennie, une discipline majeure. Le mot « fiabilité » fut créé à l'occasion d'un Colloque International sur les Semiconducteurs, organisé en février 1961 par la Société Française des Electroniciens et des Radioélectriciens, où une part importante des communications lui fut consacrée.

De plus, dans le cadre du IV^{e} Plan, l'attention des responsables fut fortement attirée sur l'intérêt de ce paramètre nouvellement défini, et ce, en particulier, par l'Administration des P et T et le CNET qui avaient, depuis longtemps déjà, pris conscience de la nécessité d'étudier la fiabilité des tubes et des composants, compte tenu des conditions imposées par l'exploitation des réseaux téléphoniques.

La Commission n° 1, Etudes et Recherches du CCT, avait inscrit dès 1960 cette préoccupation à son programme d'études. Cette question fut reprise, en l'élargissant, par le Groupe de travail « Composants électroniques » de la Commission Permanente de l'Electronique du Plan (COPEP), qui la fit inscrire en 1961 au programme des recherches prioritaires que la COPEP recommanda au Gouvernement sous forme d'une « action concertée électronique ».

Cette action fut décidée en 1962 et confiée à la Délégation à la Recherche Scientifique et Technique (DGRST) au sein de laquelle fut créé, dans ce but, un Comité de l'Electronique. Une partie des fonds de ce Comité furent consacrés à des conventions de recherche sur la fiabilité passées à des laboratoires de l'Université, des Administrations et de l'Industrie.

Parallèlement, afin de répondre au besoin manifesté d'une meilleure connaissance de la fiabilité, un Groupe spécial fut créé au CNET pour étudier les composants. Ce Groupe, qui prit naissance en octobre 1962, est connu sous le nom de « Centre de Fiabilité », son programme de travail était axé dans les trois directions suivantes :

— échange de données de fiabilité ;

— Etudes de méthodes d'essai ;

— Information et bibliographie.

De plus, il était chargé de suivre les conventions de recherche passées par la DGRST avec l'industrie visant à des études de base sur la mesure ou l'amélioration de la fiabilité.

Le rappel de ces quelques actions démontre que le problème de la fiabilité était devenu une préoccupation d'intérêt national.

4. Les diverses approches de la fiabilité

Dans une première approche, l'étude de la fiabilité des composants a été entreprise à travers la réalisation d'essais visant à connaître leur comportement sous diverses contraintes. Cette approche, que l'on peut appeler l'évaluation statistique des taux de défaillances des composants, était nécessaire, au moins dans un premier temps, ne serait-ce que pour pouvoir poser le problème. Elle constituait une sorte d'examen critique des méthodes employées pour évaluer la qualité des composants, compte tenu des exigences des utilisateurs.

De ces essais massifs, il est apparu que certains composants présentaient des points faibles entraînant la nécessité de revoir la conception de certains d'entre eux. Ils ont également permis de lancer un certain nombre d'études des phénomènes de base, en vue d'en atténuer les effets et, par conséquent, d'améliorer la fiabilité.

Mais c'était là un processus long et coûteux, si l'on tient compte du fait qu'il fallait recommencer d'autres essais massifs pour s'assurer que les améliorations et les modifications apportées avaient bien permis d'atteindre le but recherché. L'exemple le plus connu d'application de cette méthodologie a été, aux Etats-Unis, celui du programme Minuteman I.

Il fut vite reconnu qu'avec l'accroissement simultané de la complexité des systèmes et de l'amélioration de fiabilité obtenue par les fabricants de composants, la méthode employée devenait rapidement impraticable. En effet, l'augmentation de la fiabilité des composants entraînait l'obligation de mettre en essai des quantités importantes de pièces pour obtenir le degré d'assurance statistique requis.

Cependant, revenons à ce qui se passe réellement lorsqu'un fabricant évaluant la fiabilité de ces produits à travers des essais, constate qu'un certain nombre de pièces sont défectueuses. Il doit alors étudier les pièces pour déterminer comment elles ont défailli, pourquoi elles ont défailli, et comment il pourra améliorer, soit leur conception, soit leur processus de fabrication pour corriger la cause de la défaillance. En essayant de répondre à ces trois questions, les fabricants ont développé une activité nouvelle connue sous le nom d' « Analyse des défaillances ».

Cette technique, qui fait partie de ce que l'on désigne communément aujourd'hui sous le nom de « physique de la fiabilité », a rendu de nombreux services dans divers programmes d'amélioration de la fiabilité. Au moyen de microscopes optiques et électroniques, de méthodes d'analyses chimiques ou physiques, les causes de défaillance furent reliées à des caractéristiques spécifiques de la conception même du dispositif. Des méthodes d'amélioration purent alors être postulées, essayées et vérifiées par de nouveaux essais massifs.

Mais pour que cette technique d'analyse des défaillances puisse être un outil utile, il était impératif de disposer d'une quantité suffisante de composants défaillants, qui pourraient ensuite être analysés et sur lesquels des hypothèses d'amélioration de la

conception pourraient être basées. La question posée était de savoir comment obtenir ces pièces défaillantes.

A l'origine, les essais massifs étaient généralement effectués dans des conditions se rapprochant des conditions d'utilisation. Dans ces conditions, le nombre de composants-heures nécessaire pour obtenir quelques pièces défaillantes ne faisait que croître avec l'augmentation de leur fiabilité. Aussi fit-on appel à la technique dite des « Essais accélérés » qui consistait à soumettre les pièces à des conditions nettement plus sévères que celles dans lesquelles elles étaient supposées fonctionner normalement.

Cependant de tels essais accélérés recèlent un danger : on n'est pas assuré que les défaillances rencontrées sous des conditions particulièrement sévères seront celles rencontrées dans des conditions normales, même pendant un fonctionnement beaucoup plus long. Bien que devant être maniée avec précaution, cette technique s'est révélée précieuse pour les études d'amélioration de la fiabilité.

Cette méthodologie des essais accélérés, complémentaire de celle d'analyse des défaillances, constitue le deuxième volet de la « physique des défaillances ».

On a recherché aussi à utiliser les essais accélérés pour mesurer la fiabilité d'un dispositif par la détermination de facteurs reliant la durée de vie des composants dans des conditions accélérées à celle qu'ils auraient pu avoir dans des conditions normales d'utilisation. Il s'avéra qu'aucune relation simple n'existait pour la plupart des composants, quoique des modèles généralisés, tel que l'équation d'Arrhenius ait pu être de quelque utilité.

A travers toutes ces études, il apparut que les bases scientifiques sur lesquelles reposaient la connaissance des composants étaient insuffisantes. Si les ingénieurs, concevant des dispositifs, connaissaient et comprenaient parfaitement le fonctionnement général de leurs dispositifs et étaient capables de les concevoir, de les dimensionner et de les fabriquer pour des applications données, une compréhension détaillée d'effets du second ordre, permettant de caractériser et prédire les mécanismes de défaillances, n'était pas toujours disponible.

L'exemple classique est celui de la « peste pourpre » qui fut identifiée en tant que mécanisme de défaillance lorsque les transistors au silicium étaient stockés ou fonctionnaient à température élevée. Des études métallurgiques et des expériences furent nécessaires pour en identifier la cause profonde, la formation d'un composé or-aluminium fragile. Une fois cette origine identifiée, le taux de formation et d'autres caractéristiques de ce mécanisme de défaillance purent être basés sur une compréhension du phénomène métallurgique.

Indépendamment de tous ces efforts pour améliorer la fiabilité à travers les méthodes précédemment évoquées, des études de nature plus fondamentale furent entreprises, afin de déceler et de comprendre les phénomènes de base responsables de l'évolution des caractéristiques des composants au cours du temps.

En particulier, dans le domaine des semiconducteurs, si l'on connaissait assez bien les propriétés en volume du matériau, il n'en était pas de même en ce qui concerne ses propriétés en surface. En effet, les états de surface qui modifient localement les propriétés des semiconducteurs, peuvent ne pas être définitifs et évoluer au cours du temps. Cette évolution est une des causes de dégradation lente des caractéristiques des dispositifs. Aussi de nombreuses études ont-elles été lancées afin de rechercher et de mettre au point des méthodes propres à stabiliser de telles évolutions.

Dans les diverses approches que nous avons évoquées jusqu'alors, nous avons vu que les éléments servant à étudier la fiabilité résultaient avant tout d'essais effectués sur les produits. Ces méthodes présentent, en particulier, l'inconvénient d'entraîner des temps de réaction plus ou moins longs, tant au niveau de la conception que de la fabrication. Cela ne veut pas dire qu'elles soient sans intérêt pour autant, bien au contraire, mais elles ne donnent une idée de la fiabilité qu'*a posteriori*. Aussi, est née l'idée d'essayer de déterminer celle-ci *a priori*. Pour cela, on peut dire que l'on a recherché à transposer la méthode, précédemment appliquée au niveau du dispositif, au niveau de l'ensemble d'une fabrication.

C'est ainsi qu'à été lancé par le CNES le programme Concerto pour développer en France des chaînes de fabrication de composants électroniques de haute fiabilité, dont la première phase vient de se terminer.

L'idée fondamentale de ce programme était que la fiabilité doit être élaborée et contrôlée à chaque stade de la fabrication, par une analyse détaillée de chaque étape de fabrication considérée comme une opération particulière, le but recherché étant de rendre reproductible et fiable chacune d'entre elles.

Nous n'insisterons pas sur le programme Concerto qui a fait l'objet de nombreuses communications et d'articles ces dernières années, signalons toutefois qu'il s'applique à une large gamme de composants (*).

5. Conclusion

Devant la complexité du problème posé par la fiabilité, nous avons, à travers ce bref aperçu, essayé de montrer comment ont évolué les efforts entrepris par les fabricants de composants pour essayer d'améliorer leurs produits.

Il convient de reconnaître que de grands progrès ont été faits, spécialement durant ces dix dernières années.

Mais force est de constater que leurs efforts, dans le sens d'une amélioration constante, ne seront jamais terminés. C'est là une tâche sans fin, d'autant que l'évolution de la technique, si elle élimine d'anciennes causes de défaillances, en introduit aussi de nouvelles par suite de l'apparition de nouveaux matériaux, procédés technologiques ou de nouvelles conceptions de composants.

(*) Voir l'article de M. ARCISZEWSKI dans *L'Onde Electrique*, vol. 41, fasc. 4, avril 1970, pp. 265-274.

J. BLOUET

Chef de Service
Laboratoire Central
des Industries
Electriques

Evolution de la mesure

1. Introduction

Dresser un tableau complet de l'évolution de la mesure au cours du demi-siècle écoulé excéderait à la fois les dimensions de cet article et les compétences de son auteur dont l'expérience personnelle ne couvre que les deux cinquièmes de cette période.

Il ne faut donc pas considérer ce propos comme une œuvre historique mais plutôt comme une tentative pour essayer de dégager les grandes tendances et les plus importantes étapes, vues de 1971, qui ont marqué cette évolution.

2. Les grands courants de l'évolution

2.1. Evolution générale du matériel électronique

Les mesures étant destinées au contrôle des matériels électroniques et les appareils de mesure mettant en œuvre des techniques analogues, tout progrès réalisé dans le domaine du matériel a entraîné une évolution parallèle dans le domaine de la mesure. Les différents aspects de l'évolution du matériel sont traités par ailleurs et nous ne ferons ici que mentionner leurs conséquences au plan de la mesure.

C'est ainsi, par exemple, que l'extension des communications vers les ondes courtes et très courtes, puis ensuite l'apparition de la détection électromagnétique utilisant les microondes, ont provoqué l'élargissement de la mesure aux mêmes gammes de fréquence. Parallèlement, l'utilisation de nouveaux procédés tels que la modulation de fréquence, par exemple, a fait naître de nouveaux besoins et a conduit à développer les techniques et appareillages de mesure appropriés.

L'évolution technologique générale a eu une grande importance et a modifié profondément la physionomie et les possibilités d'utilisation des appareils de mesure. A la suite de l'emploi généralisé des transistors, les appareils sont devenus légers, maniables et leur consommation a considérablement diminué. On réalise ainsi couramment des montages d'essai rassemblant un grand nombre d'appareils différents et qu'il aurait été impossible de mettre en œuvre simultanément à l'époque des tubes électroniques, tant à cause de l'encombrement que des puissances d'alimentation disponibles sur les tables de laboratoire ou de la dissipation admissible dans les salles climatisées. D'autre part, et grâce en particulier aux circuits intégrés, il est possible d'incorporer aux appareils de mesure des circuits supplémentaires assurant des fonctions parfois très complexes telles que le traitement statistique des résultats de mesure.

L'amélioration de la fiabilité s'est également développée de façon parallèle dans les équipements électroniques et les appareils de mesure qui doivent accomplir sans défaillance le service qu'on en attend. On ne saurait admettre maintenant, même pour un appareil de pointe servi par un personnel hautement qualifié, un fonctionnement capricieux nécessitant, comme nous l'avons vu faire quelquefois dans le passé, des opérations quasi rituelles d'un technicien entourant *son* appareil d'un soin jaloux.

Enfin, les nouvelles orientations technologiques adoptées pour les équipements, même si elles n'intervenaient pas directement dans la construction des appareils de mesure, ont réagi indirectement sur leur évolution en suscitant, lors de leur apparition, de nouveaux problèmes de mesure. C'est ainsi, par exemple que, dans le domaine des hyperfréquences, l'utilisation des guides d'ondes avait entraîné le développement de nombreux matériels utilisant cette technique : lignes fendues, adaptateurs, montures bolométriques, etc. Actuellement, les lignes coaxiales

miniatures semi-rigides dont le comportement est excellent en microondes, tendent de plus en plus à supplanter les guides d'ondes, tout au moins pour les applications à faible puissance. Le matériel de mesure est dans l'obligation de suivre cette évolution et tous les éléments de circuit développés antérieurement sur guide d'ondes apparaissent maintenant en coaxial.

2.2. Les tendances de la mesure

2.2.1. Evolution des besoins et des possibilités

Dès l'origine de la TSF, la mesure a joué un rôle important dans la compréhension des phénomènes. On constate, en feuilletant les revues de l'époque, que ce furent les mêmes ingénieurs qui développèrent simultanément les techniques des radiocommunications et les techniques de mesure adaptées à leurs besoins. Ce n'est que peu à peu que certains d'entre eux se spécialisèrent dans les mesures et consacrèrent leur activité à la conception et à la réalisation d'appareillages dont les possibilités dépassaient souvent les besoins de l'époque. En cas de contestation sur une mesure, un recoupement entre les résultats donnés par plusieurs appareils suffisait alors dans la plupart des cas à lever le doute.

Le passage progressif de l'ère artisanale à l'ère industrielle fit apparaître ensuite la nécessité de disposer d'un Laboratoire de Métrologie disposant de références nationales de haut niveau et capable de jouer le rôle d'arbitre impartial. Cette mission fut d'abord confiée au Laboratoire National de Radioélectricité qui effectua d'importants travaux, dans le domaine des étalons de fréquence notamment. Après la deuxième guerre mondiale, l'activité métrologique dans les domaines autres que les mesures de fréquence fut reprise par le Laboratoire Central des Industries Electriques qui assurait déjà, par ailleurs, la métrologie électrique traditionnelle.

Ce n'est cependant que depuis une dizaine d'années que l'importance de la métrologie est universellement reconnue. Auparavant, elle était considérée par beaucoup comme une discipline intéressante sur le plan intellectuel, mais de faible utilité sur le plan industriel. Lorsqu'on entreprit la fabrication de systèmes complexes dont les différents éléments étaient construits par des firmes réparties dans plusieurs pays, il fallut emprunter un langage commun pour exprimer les caractéristiques mesurées sur les sous-ensembles ; ainsi la métrologie se révéla-t-elle comme une nécessité industrielle. On assista alors à un renversement de la situation : les métrologistes qui, pendant de nombreuses années, se trouvaient en avance sur les besoins, sont maintenant poussés par les demandes de l'industrie soit pour améliorer les précisions, soit pour aborder de nouveaux domaines de grandeurs ou de valeurs.

2.2.2. De la TSF à l'électronique

Les premiers appareils électroniques de mesure étaient exclusivement destinés à la radioélectricité et couvraient soit le domaine de la haute fréquence pour les mesures sur les ondes porteuses, soit le domaine de la basse fréquence pour les modulations. Il en fut ainsi pratiquement jusqu'à la deuxième guerre mondiale ; après celle-ci, la mesure électronique commença d'étendre son champ d'application en abordant de nouvelles techniques telles que les avertissements ou l'électronique nucléaire. Cette ouverture fut soulignée d'ailleurs par la Société des Radioélectriciens qui changea alors de nom pour devenir Société Française des Electroniciens et des Radioélectriciens.

Continuant ses conquêtes, l'électronique aborda le domaine des mesures en courant continu pour lequel des techniques bien rôdées existaient depuis longtemps, et son apport dans cette discipline fut considérable. Il n'est, pour s'en convaincre, que de visiter aujourd'hui un laboratoire de mesure et de constater la place qu'y tient l'électronique : régulation de température des piles étalons, détecteurs électroniques sensibles, sources étalonnées, voltmètres numériques, etc.

Actuellement, l'électronique est présente dans tous les domaines de mesure, en électricité bien sûr, mais aussi en biologie, en optique, en mécanique, en chimie... Elle intervient au niveau de la recherche fondamentale comme au niveau des applications les plus banales : le gendarme qui, sur la route, vous dresse contravention pour excès de vitesse, utilise pour la mesure un radar Doppler. Certains penseront sans doute que ce n'est pas là la plus belle conquête de la mesure électronique, mais cela illustre assez bien son universalité.

2.2.3. Mesureurs ou générateurs

Pour la plupart des grandeurs, il peut exister deux types complémentaires d'appareils de mesure ; tout d'abord, l'appareil qui mesure la valeur d'une grandeur donnée et qui donc constate un effet, par exemple, un microvoltmètre mesurant la tension au pied d'une antenne. Le deuxième type d'appareil produit une grandeur de valeur déterminée et est utilisé pour simuler un phénomène agissant sur un équipement, par exemple, un générateur à haute fréquence connecté à l'entrée d'un récepteur. Les deux conceptions ont existé très tôt, le cas du générateur HF est là pour l'attester, mais, pendant longtemps, la famille des mesureurs a été beaucoup plus importante que la famille des générateurs. Là aussi, c'est surtout depuis une dizaine d'années que s'est systématisé le développement parallèle des deux familles. On trouve maintenant les appareils des deux types pour presque tous les domaines : tensions continues, voltmètres ou générateurs étalonnés ou voltmètres différentiels combinant les deux, tensions alternatives à haute et basse fréquences, phases, fréquences, forme d'onde, etc.

2.3. Etapes clés

2.3.1. L'oscillographe cathodique

L'apparition de l'oscillographe cathodique a mis fin à l'ère aveugle de l'électronique. Auparavant, le signal électrique était une abstraction dont il fallait

imaginer la forme d'après les effets qu'il produisait ; avec l'oscillographe, on « voit » le signal, on peut suivre son cheminement dans les étages successifs d'un équipement et contrôler instantanément l'effet d'une modification. Aussi cet appareil est-il devenu très rapidement l'outil de base du laboratoire d'électronique.

Lorsqu'il fit ses débuts vers les années 30, l'oscillographe était évidemment loin d'avoir les possibilités des modèles actuels. Depuis cette époque, des progrès spectaculaires ont été accomplis dans tous les domaines : la bande passante s'étend maintenant du continu aux hyperfréquences, les amplificateurs sensibles permettent de visualiser des signaux de quelques dizaines de microvolts, les déviations verticales et horizontales sont étalonnées, les tubes à mémoire peuvent garder une image pendant plusieurs heures, mais, à notre avis, le progrès fondamental date de l'apparition des systèmes de synchronisation du balayage simples à régler et parfaitement verrouillés. L'oscillographe a alors cessé d'être un appareil dont l'emploi était réservé aux seuls spécialistes et son développement a connu un prodigieux essor dans toutes les disciplines ; son emploi est devenu tellement naturel et instinctif qu'on a peine à imaginer comment pourrait fonctionner un laboratoire sans lui.

2.3.2. La révolution numérique

Dans un article publié en 1929 dans *L'Onde Electrique,* M. B. Decaux disait : « La mesure d'une fréquence consiste, comme l'eut dit M. de la Palisse, à compter le nombre d'oscillations dans l'unité de temps. » Un fabricant d'appareils de mesure imagina un jour de construire un fréquencemètre sur ce principe. Le comptage était effectué par une série de décades pouvant prendre chacune dix états électriques successifs différents ; les différents états étaient repérés par l'allumage de petites lampes marquées de zéro à neuf. A la fin de la période de comptage d'une seconde, l'indication de l'état des décades correspondait donc au nombre d'unités, dizaines, centaines, et milliers d'alternances du signal d'entrée pendant cette même période. Le nombre affiché exprimait directement la valeur de la fréquence. La révolution numérique était commencée !

Le système d'affichage se perfectionna de manière à présenter une lecture en ligne des résultats, puis divers procédés numériques furent mis au point pour la mesure des tensions continues et de nombreuses autres grandeurs.

Le premier avantage d'un appareil numérique est évidemment de permettre une lecture directe, facile même à distance et sans erreurs. D'autre part, le résultat de la mesure étant élaboré directement sous une forme numérique, il est aisé de coupler à l'appareil une imprimante enregistrant les résultats. Le développement des appareils de ce type a été un facteur déterminant dans l'augmentation de la précision des instruments, non pas directement car le fait de présenter les résultats sous une forme numérique n'améliore pas pour autant les qualités intrinsèques d'un système de mesure, mais indirectement : l'augmentation, dans un rapport égal à 10, de la précision permet en effet d'ajouter un chiffre à la lecture, ce qui constitue un argument de vente puissant.

Cependant, toute révolution a ses excès et ses aspects négatifs, et la révolution numérique, malgré un bilan d'ensemble très largement positif, n'échappe pas à cette règle : on doit inscrire à son passif deux tendances néfastes qu'il ne faut pas se dissimuler si l'on veut pouvoir les éviter. Ces défauts ne sont d'ailleurs pas imputables aux appareils mais à ceux qui les utilisent.

La première tendance consiste à identifier les notions d'appareil moderne et d'appareil numérique, et, par voie de conséquence, à considérer les autres sortes d'appareils comme désuètes. Ce travers est surtout fréquent dans les jeunes générations de techniciens. Il existe cependant des applications pour lesquelles l'indication d'une aiguille est infiniment préférable à l'affichage d'un nombre, en particulier dans tous les cas où l'on ne recherche pas une mesure fine mais un ordre de grandeur ou une tendance. S'il s'agit par exemple d'effectuer un réglage pour obtenir un maximum, la lecture d'un appareil analogique à aiguille est intuitive et instantanée, alors qu'avec un appareil numérique, il faut lire et comprendre chaque lecture successive et de plus les retenir pour les comparer afin de déterminer le sens de la variation. Il en est de même pour les tableaux de contrôle comportant de nombreux appareils ; un opérateur exercé décèle d'un coup d'œil une anomalie de fonctionnement si le tableau est équipé d'appareils à aiguille ; avec les appareils numériques, il lui faudrait lire successivement chaque nombre affiché.

Le deuxième danger tient au fait que l'affichage numérique force extraordinairement la confiance · on ne doute pas d'un résultat qui s'inscrit de manière stable avec un grand nombre de chiffres significatifs. Cette foi dans l'appareil numérique fait parfois oublier aux utilisateurs que l'appareil peut dériver et qu'il est nécessaire de vérifier périodiquement si les erreurs ne sont pas devenues prohibitives. Surtout elle introduit très fréquemment une confusion entre la résolution d'un appareil et sa précision : ainsi rencontre-t-on couramment des appareils équipés de cinq décades, ce qui donne une résolution de 10^{-5}, mais dont la précision est seulement de 10^{-4}, et que les opérateurs utilisent comme si leur précision était également de 10^{-5}. Il convient d'attirer l'attention des utilisateurs sur cette distinction qui, il faut le reconnaître, n'apparaît pas toujours avec évidence à la lecture des notices des constructeurs. Dans l'exemple précédent, le dernier chiffre apporte une indication valable pour déceler des variations ou pour des mesures comparatives, mais il n'est pas à prendre en considération dans l'expression en valeur absolue du résultat de la mesure.

2.3.3. L'ère de l'informatique

L'utilisation de l'informatique dans la mesure n'étant encore qu'à ses débuts, il est trop tôt pour dresser un bilan ou même pour en dégager les tendances. Cependant, l'industrie des instruments de mesure s'est préparée à ce tournant et il existe d'ores

et déjà de nombreux appareils programmables conçus pour être utilisés en liaison avec un ordinateur donnant les ordres de mesure et assurant l'exploitation des résultats. Ce type d'appareil a été employé en premier lieu lorsqu'on avait à vérifier très rapidement le bon fonctionnement d'équipements complexes. Il n'est en effet pas possible d'effectuer dans un temps acceptable, avec des appareils classiques et des opérateurs, le grand nombre de mesures que nécessitent le contrôle et la comparaison des résultats avec les valeurs limites admises. Seule une centrale de mesure automatique est capable de mener à bien ces opérations.

Dans le cas d'une centrale de mesure pilotée par un calculateur, seul le programme d'essai est spécifique du type d'équipement à vérifier ; il suffit d'introduire un autre programme dans le calculateur pour passer à la vérification d'un autre type d'équipement, dans les limites, bien entendu, des possibilités des appareils équipant la centrale. A titre d'exemple, l'équipement de test automatique ATEC réalisé par la SNIAS pour vérifier les équipements de bord de Concorde a été adapté ultérieurement, grâce à l'établissement d'une bibliothèque de programmes, à la vérification des équipements d'une vingtaine de types d'avions. Le calculateur central pilote simultanément plusieurs stations d'essais dont l'une, par exemple, peut vérifier les équipements analogiques (pilote automatique, central gyroscopique, etc.), et une autre les matériels radioélectriques. Un tel ensemble présente une grande souplesse d'utilisation sans rester limité aux équipements actuels puisque l'élaboration de nouveaux programmes lui permettra de répondre aux besoins futurs.

Dans le domaine des mesures de laboratoire, d'intéressantes applications des centrales de mesure aux fins d'étalonnages ont déjà été faites mais, semble-t-il, dans le but principal d'explorer les possibilités de ces systèmes de mesure ; en effet, le volume des travaux de ce type ne paraît pas suffisant pour justifier les investissements correspondants.

2.4. Exemples d'évolution

Les tendances générales dégagées plus haut se superposent avec plus ou moins de netteté à l'évolution particulière de chaque type de mesure. On peut illustrer ce fait en considérant le développement qu'ont connu les mesures des deux grandeurs de base utilisées dès l'origine en radioélectricité : la fréquence et la puissance.

2.4.1. Mesure des fréquences

Les premières mesures des fréquences radioélectriques ont été faites, semble-t-il, au moyen d'ondemètres à résonance de divers types ; les différences résidaient dans l'élément d'accord du circuit, condensateur ou inductance variable, et surtout dans le procédé de détection de la résonance : lampe à incandescence, ampèremètre thermique, échauffement d'un fil plongé dans le réservoir d'un thermomètre, etc. Le procédé le plus original est sans doute celui qu'utilisa M. SLABY : son ondemètre, décrit en 1908, est constitué par un solénoïde dont l'extrémité est garnie d'une petite plaque de platinocyanure de baryum qui s'illumine par les effluves que dégage le ventre de tension qu'on forme en cette extrémité (fig. 1).

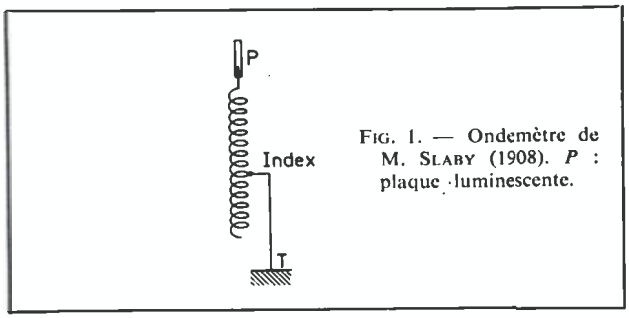


FIG. 1. — Ondemètre de M. SLABY (1908). *P* : plaque luminescente.

En 1917, l'invention du multivibrateur d'ABRAHAM et BLOCH marque une étape importante : la fréquence propre d'un oscillateur délivrant un signal très riche en harmoniques et baptisé par ses inventeurs « multivibrateur », est réglée à 1 000 Hz par comparaison avec un diapason. On compare ensuite la fréquence à mesurer avec les harmoniques du multivibrateur. Une précision de l'ordre de quelques dix millièmes pouvait être obtenue avec cet appareil.

Dans les ondemètres hétérodynes, la fréquence à mesurer est comparée, par battements, à la fréquence d'un oscillateur stable préalablement étalonné. E. FROMY réalise en 1925 un ondemètre de ce type (fig. 2) conçu pour être d'un emploi commode et dans lequel les variations des tensions d'alimentation sont pratiquement sans effet. Cet appareil permet déjà des mesures à 10^{-5} près.

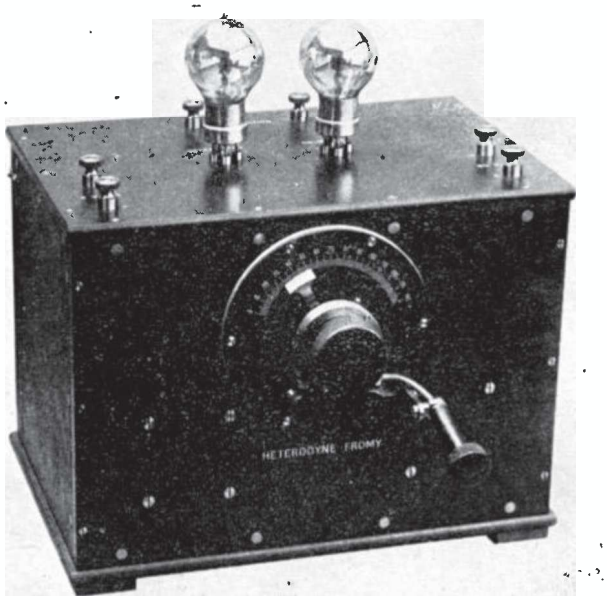


FIG. 2. — Ondemètre hétérodyne de E. FROMY (1925).

La nécessité d'une référence nationale se faisant sentir, B DECAUX entreprend vers 1928, au Laboratoire National de Radioélectricité, la constitution

d'un ensemble de mesure absolue des fréquences radioélectriques. La fréquence est alors définie à partir de la seconde, fraction 1/86 400 du jour solaire moyen. La base du dispositif est un oscillateur à diapason en élinvar, placé dans une enceinte thermorégularisée et fonctionnant à 1 024 Hz. La division de fréquence nécessaire pour comparer la fréquence de ce diapason aux horloges astronomiques s'effectue au moyen d'une roue phonique ; l'oscillateur commande des multiplicateurs allant jusqu'à 3 MHz et des oscillateurs à quartz fournissent des harmoniques jusqu'à 100 MHz ; la précision obtenue est de l'ordre de 2 à 3.10^{-5}. Une émission de fréquence étalon est en projet.

On voit que, dès cette époque, tous les éléments d'un laboratoire de métrologie sont en place et les mesures et appareillages ne font que se perfectionner au cours des années suivantes. En particulier, de nombreux dispositifs d'enregistrements sont mis au point et permettent des comparaisons permanentes entre divers oscillateurs et des horloges astronomiques battant soit le temps solaire, soit le temps sidéral. Ce sont alors les oscillateurs qui contrôlent la qualité des horloges et non l'inverse. Les comparaisons internationales en 1936 font apparaître des écarts inférieurs à 10^{-7}.

Les oscillateurs continuant à se perfectionner deviennent plus stables, si bien que la seconde définie à partir de la rotation de la terre sur elle-même est d'une constance insuffisante pour servir de référence. On convient donc en 1960 d'une définition fondée sur la translation, temps mis par la terre à accomplir sa rotation autour du soleil au cours de l'année 1900.

Un progrès décisif est accompli lorsqu'apparaissent les premiers oscillateurs synchronisés sur la fréquence associée à une transition atomique. Le gain en stabilité à long terme est considérable et la reproductibilité du phénomène est telle qu'elle conduit la Conférence Générale des Poids et Mesures à changer en 1967 la définition de la seconde pour la rattacher à la fréquence de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

Il existe actuellement en France un groupe d'oscillateurs de ce type qui sont en permanence intercomparés par l'intermédiaire du réseau de télévision : chaque laboratoire repère l'instant où apparaît une impulsion déterminée figurant dans les lignes tests du signal vidéo, l'échelle des temps étant évaluée à partir de son propre oscillateur. La comparaison des mesures effectuées par les différents laboratoires permet de suivre l'évolution relative des oscillateurs. Leur stabilité sur plusieurs mois se chiffre en 10^{-13}, la sensibilité de la mesure étant dix fois meilleure ; utilisés en horloge, ils restent d'accord entre eux à quelques dizaines de microsecondes près pendant plusieurs années.

Dans le domaine des mesures industrielles, le fréquencemètre hétérodyne reste longtemps l'appareil de base de la lignée des mesureurs pour les fréquences inférieures à 100 MHz. Au-delà, et principalement dans le domaine des microondes, on utilise des ondemètres à résonance. Cette situation se maintient jusqu'à l'apparition des fréquencemètres numériques dont les possibilités de mesure sont limitées au départ à 1 ou 10 MHz, mais auxquels viennent s'adjoindre très rapidement des fréquencemètres hétérodynes qui permettent, en deux étapes successives, d'atteindre les hyperfréquences. Les fréquencemètres numériques restent lourds et encombrants jusqu'à l'utilisation des transistors et surtout des circuits intégrés qui rendent possible la miniaturisation des équipements. Pour illustrer le progrès ainsi réalisé, il suffit de comparer le minifréquencemètre de 25 cm de longueur environ représenté sur la figure 3 à l'étalon de fréquence que possédait le même constructeur vers 1950. Le pilote du fréquencemètre associé à ses diviseurs qui ne constitue pourtant qu'une partie de l'appareil, offre approximativement les mêmes possibilités de mesure avec la même précision que l'énorme banc de 1950.

Dans la lignée des générateurs, il est intéressant de signaler la mise au point, en 1937, par la SIF

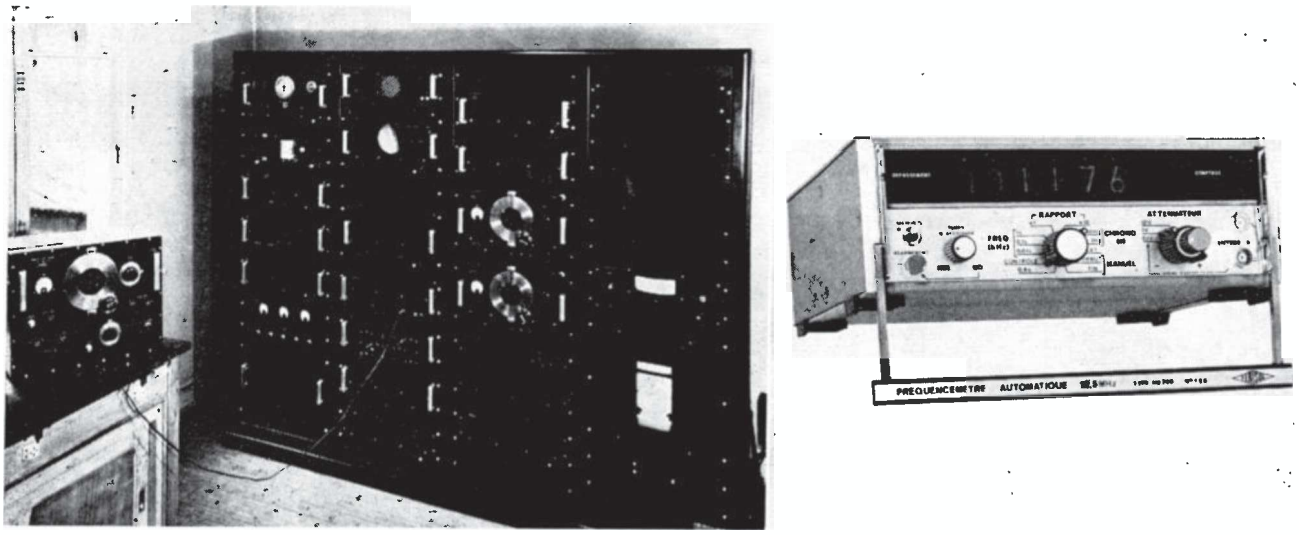


FIG. 3. — Miniaturisation des appareils. A gauche : l'étalon de fréquence d'un constructeur vers 1950. A droite : un fréquencemètre miniature ayant les mêmes possibilités (1969).

d'un générateur réalisant, à partir d'un oscillateur à quartz, la synthèse d'une fréquence quelconque dans la gamme 10 kHz - 20 MHz tout en gardant la précision du pilote. L'appareil comportait des multiplicateurs et démultiplicateurs commandant des oscillateurs synchronisés attaquant eux-mêmes des mélangeurs. Le schéma de principe en est représenté sur la figure 4. L'utilisation de ce type de générateur

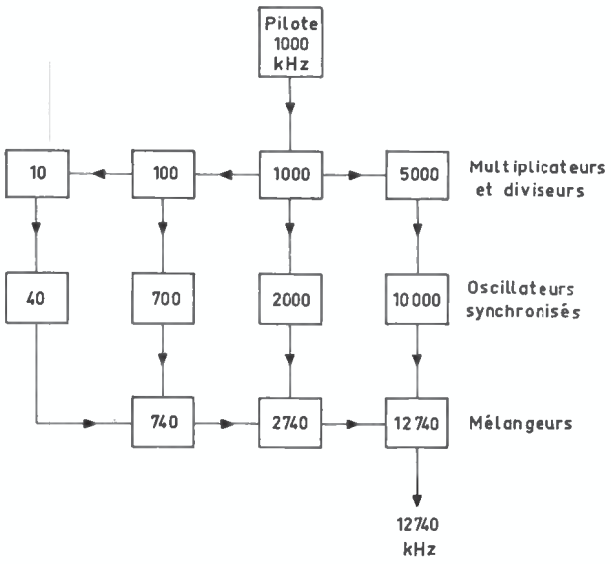


FIG. 4. — Schéma de principe du synthétiseur SIF de 1937. (Les réglages représentés correspondent à la synthèse d'une fréquence de 12 740 kHz).

ne s'est vraiment répandu que beaucoup plus tard lorsque, baptisés entre temps « synthétiseurs », la miniaturisation a permis de leur donner des dimensions acceptables. La figure 5 représente un appareil de ce type montant à 60 MHz avec une résolution de 1 Hz et comportant des possibilités de modulation en amplitude ou en fréquence et de synchronisation ; de plus, l'appareil est programmable.

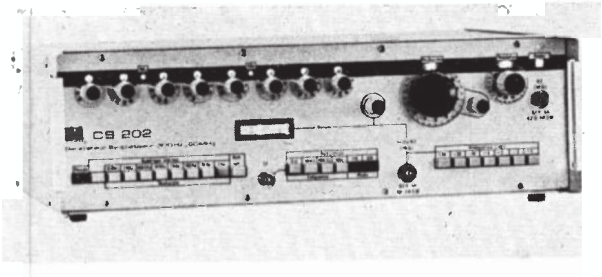


FIG. 5. — Synthétiseur moderne 60 MHz.

2.4.2. Mesure des puissances

La méthode bolométrique qui est fondée sur la variation de la résistance, en fonction de la température, d'un élément dans lequel on dissipe la puissance à mesurer, est l'une des premières à avoir été utilisée pour détecter l'énergie aux fréquences radioélectriques.

L'ouvrage d'ARMAGNAT et BRILLOUIN, « Les Mesures en Haute Fréquence », publié en 1928, décrit un pont bolométrique dont le schéma est reproduit sur la figure 6. L'élément bolométrique R_1 est constitué par une petite lampe à incandescence à filament de tungstène fin ; la puissance haute fréquence à mesurer est appliquée entre les points p et q et dissipée dans la lampe R_1 ; l'élément R_2,

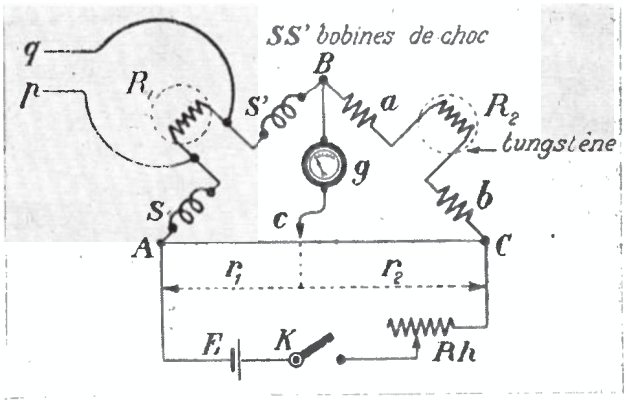


FIG. 6. — Schéma de principe d'un pont bolométrique décrit en 1928 par MM. ARMAGNAT et BRILLOUIN.

identique à R_1, permet de compenser les variations de la source ou de la température ambiante.

Ce pont comporte déjà tous les éléments figurant dans les appareils utilisés actuellement ; pourtant, la méthode bolométrique fut complètement abandonnée pendant de longues années au profit des ampéremètres à thermocouples mesurant l'intensité du courant en haute fréquence.

Le convertisseur à thermo-élément était primitivement constitué par deux fils croisés, fer et constantan par exemple, en contact au point de croisement. Le courant à mesurer circulait entre l'une des extrémités du fil de fer et l'une des extrémités du fil de constantan, échauffant ainsi la moitié de chacun des fils et leur jonction ; le galvanomètre qui mesurait la tension produite par le thermocouple ainsi constitué était connecté aux deux autres extrémités des fils. Par la suite, le thermo-élément fut perfectionné en soudant un thermocouple fer-constantan sur un fil fin traversé par le courant. Le défaut majeur de ces éléments tient à ce que le circuit du galvanomètre n'est pas isolé du circuit à haute fréquence : une partie importante du courant à mesurer peut donc être dérivée par la capacité par rapport à la masse du galvanomètre, ce qui fausse complètement la mesure.

Un progrès important fut accompli avec les thermo-éléments isolés dans lesquels une petite perle de verre sépare le thermocouple de l'élément chauffant et assure en même temps le contact thermique. Le défaut mentionné ci-dessus disparaît alors.

A la demande des utilisateurs, le Laboratoire Central des Industries Electriques réalisa, vers 1953, des bancs d'étalonnage d'ampèremètres à haute fréquence. Le premier banc, qui couvrait la gamme de 1 à 30 MHz, comportait une impédance étalon constituée par un condensateur dont l'inductance

interne était très faible, et aux bornes de laquelle on mesurait la chute de tension produite par le passage du courant à mesurer.

Le deuxième banc, fonctionnant à 100 MHz, utilisait un principe original de comparateur de courant imaginé par E. FROMY et reposant sur les propriétés des lignes en quart d'onde. Dans une telle ligne, le rapport entre le courant à une extrémité et la tension à l'autre extrémité est égal, quelles que soient les valeurs des impédances terminales, à l'impédance caractéristique, et peut donc être déterminé à partir des dimensions géométriques de cette ligne. Si on connecte deux lignes en quart d'onde à la même source de tension, le rapport des courants aux extrémités est égal à l'inverse du rapport des impédances. Ce rapport est limité par les valeurs extrêmes d'impédance caractéristique qu'on peut réaliser pratiquement et qui sont respectivement 15 et 150 Ω. Pour obtenir un rapport supérieur à 10, le banc comporte un tronçon en trois-quarts d'onde (fig. 7)

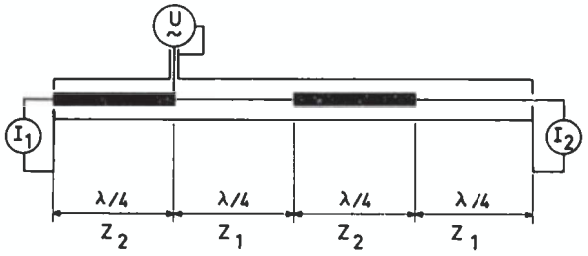


FIG. 7. — Schéma de principe d'un banc d'étalonnage des ampèremètres à 100 MHz. $I_1/I_2 = Z_1^2/Z_2^2$.

comprenant successivement un élément de ligne d'impédance caractéristique Z_1, puis un élément Z_2 et à nouveau un élément Z_1. Avec cette configuration, le rapport entre la tension à l'entrée de la ligne et le courant à la sortie est égal à $\frac{Z_1}{Z_2^2}$. Si on connecte ce ce tronçon en 3 λ/4 et un tronçon λ/4 d'impédance Z_2 à une même source délivrant une tension U, le rapport entre les courants aux extrémités des deux lignes est égal à

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_1^2}{Z_2^2},$$

avec les valeurs de 150 Ω et 15 Ω, on obtient :

$$\frac{I_1}{I_2} = 100.$$

Le banc réalisé sur ce principe permettait de comparer un ampèremètre à thermocouple de calibre 10 A pour lequel l'effet de peau était important à 100 MHz, à un thermo-élément de calibre 100 mA pour lequel cet effet était négligeable. La précision de l'étalonnage était de 3 %. Un banc fondé sur le même principe fut réalisé pour la fréquence de 300 MHz.

Le développement de l'utilisation des hyperfréquences a remis en honneur la méthode bolométrique pour les mesures de puissance et les appareils de mesure correspondants commencèrent à se répandre vers 1950.

Le principe de la méthode est le suivant :

Le bolomètre, fil fin ou thermistance, est inséré dans un pont de Wheatstone dont le courant d'alimentation est réglé de manière à amener la résistance du bolomètre à une valeur déterminée, généralement 200 Ω, repérée par l'équilibre du pont. Après application de la puissance haute fréquence, le courant du pont est réduit de manière à retrouver la valeur initiale de résistance, donc la même température du bolomètre et par suite, la même puissance globale dissipée dans l'élément. La puissance haute fréquence à mesurer est alors égale, en première approximation tout au moins, à la variation de la puissance dissipée en courant continu dans le bolomètre.

Avec l'apparition d'appareils réalisant automatiquement l'équilibrage du pont et l'affichage en lecture directe de la puissance mesurée, cette méthode s'est très largement répandue et a supplanté toutes les autres. Elle reste encore maintenant la méthode de base la plus utilisée et la plus sûre.

Pour répondre à la demande d'étalonnage dans ce domaine, le LCIE a entrepris, voici quelques années, la réalisation d'étalons de puissance en hyperfréquence. Ces équipements permettent de mesurer l'efficacité d'une monture bolométrique, c'est-à-dire le rapport, voisin de l'unité, entre la variation de puissance en courant continu prise comme mesure de la puissance haute fréquence, et la valeur réelle de la puissance haute fréquence dissipée dans la monture. On utilise, pour déterminer ce rapport, la variation d'échauffement de la monture qui est placée dans ce but dans un microcalorimètre.

La première réalisation a été effectuée sur guide d'ondes en bande X (8,2 - 12,4 GHz) (fig. 8) et

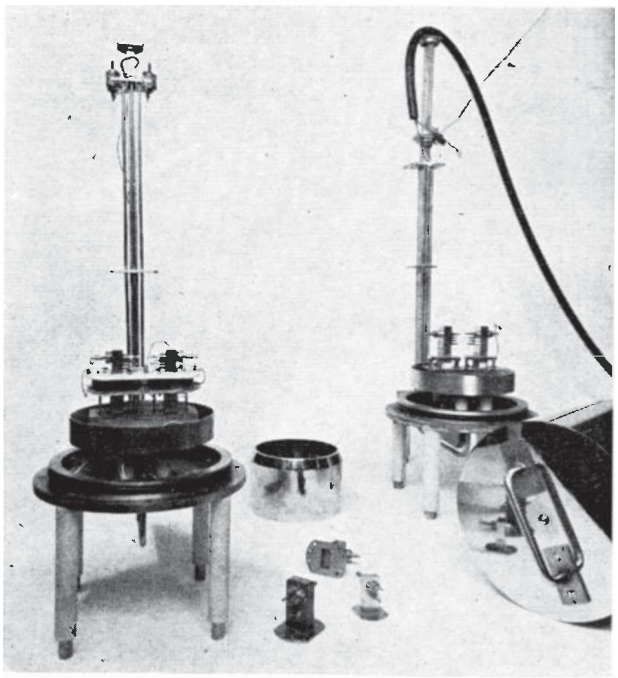


FIG. 8. — Etalons de puissance pour les bandes 8,2 - 12,4 et 12,4-18 GHz sur guides d'ondes.

permet d'obtenir, pour l'étalonnage d'un wattmètre, une erreur inférieure à 0,3 %, valeur qui a été confirmée par plusieurs comparaisons internationales.

Par suite de l'évolution technologique mentionnée plus haut, les besoins d'étalonnage se situent de plus en plus dans le domaine du coaxial et, pour répondre à cette demande, le LCIE développe actuellement un étalon sur coaxial couvrant la bande 100 - 18 000 MHz.

2.4.3. L'étrange cas du Q-mètre

Dans ce panorama de l'évolution de la mesure, le Q-mètre* mérite une mention particulière. Il trouve en effet rapidement sa forme quasi définitive (fig. 9) et, au milieu de bouleversements qui ont

FIG. 9. — Mesure au Q-mètre (1953).

affecté les appareils de mesure, il a poursuivi une carrière exemplaire avec quelques améliorations de détail mais sans aucune modification fondamentale ni dans son principe, ni même dans sa présentation. De nos jours, il continue de correspondre à un besoin et n'est nullement périmé. Cela tient sans doute au fait que, pour les mesures de pertes, cet appareil est le seul qui puisse être considéré comme référence ; il permet, en effet, sans équipement supplémentaire, l'évaluation de toutes les causes d'erreur pouvant influer sur la mesure.

3. L'appareil de mesure dans la société de consommation

Il est incontestable qu'on ne lance pas un appareil de mesure comme un nouveau dentifrice ; cependant, l'appareil de mesure est devenu plus ou moins un produit de grande consommation, comme le montre d'ailleurs l'évolution de la publicité (fig. 10). Nous voici passés de l'époque où l'on avait *besoin* d'acheter un appareil à celle où l'on a non seulement *besoin*, mais *envie* d'acheter un appareil ; dans ce cas, les

FIG. 10. — Evolution de la publicité dans *L'Onde Electrique* (1930, 1947 et 1968).

(*) Appelé aussi Acuimètre ou même Kummètre suivant certains auteurs.

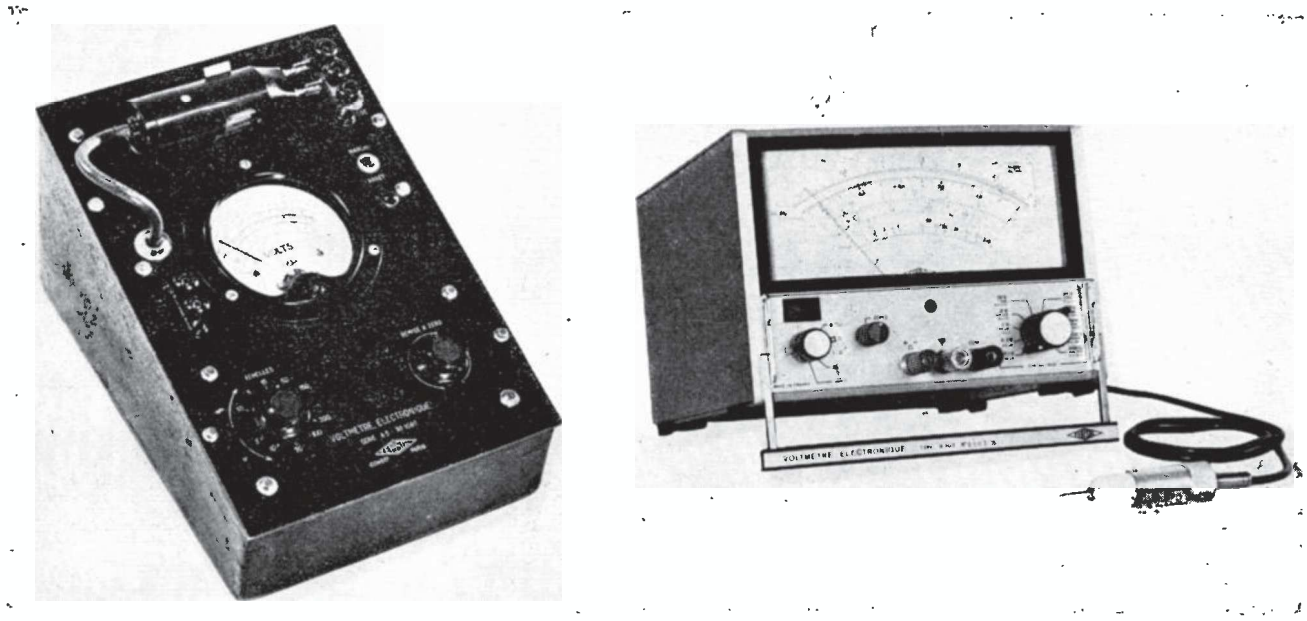


FIG. 11. — Evolution de la présentation des appareils.

critères techniques ne sont plus les seuls pris en considération. Cette situation a retenti sur la construction des appareils car les fabricants ont tout naturellement cherché à développer, chez leurs clients potentiels, cette envie d'acheter leur matériel.

L'effort en ce sens a tout d'abord porté sur l'amélioration de la commodité d'emploi en facilitant la lecture des indicateurs et la compréhension de l'utilisation par une disposition logique des commandes et des inscriptions. Les constructeurs ont ensuite amélioré la présentation de leurs appareils pour les rendre agréables à regarder et on ne peut que s'en féliciter quand on se rappelle l'aspect funèbre des appareils construits il y a une vingtaine d'années (fig. 11). On a vu enfin apparaître sur de nombreux équipements des « gadgets » amusants, quelquefois même utiles, mais dont l'intérêt ne justifie pas fréquemment l'augmentation de prix qu'ils entraînent.

On assiste assez souvent chez les acheteurs d'appareils de mesure à une réaction courante chez les acheteurs d'automobiles, à savoir l'acquisition pour une question de « standing » d'un instrument dont les performances sont très supérieures aux besoins ; cette tendance est dangereuse dans les laboratoires de mesure (parfois aussi sur les routes !...) car elle conduit à un équipement d'ensemble mal équilibré : les domaines suréquipés ayant absorbé tous les crédits disponibles, il reste à côté d'eux des domaines importants dont les besoins ne sont pas couverts.

Enfin, pour évoquer une dernière analogie avec le marché des produits de grande consommation, des utilisateurs d'appareils de mesure soucieux d'acheter « raisonnablement », se sont groupés pour mettre en commun leur expérience et des résultats d'essais, formant ainsi une sorte d'union de consommateurs.

4. Conclusion

Ce survol rapide d'un demi-siècle de mesure fait apparaître surtout les progrès considérables accomplis par le matériel et peut laisser croire que l'importance de l'opérateur soit allée en diminuant.

La réalité est toute autre car, s'il est exact que l'opérateur intervient moins qu'autrefois dans l'exécution de la mesure, son rôle reste fondamental dans l'analyse de la validité de la méthode et de l'influence des diverses sources d'erreurs, et cette critique est d'autant plus délicate que l'appareil est plus complexe et plus précis.

Nous remercions MM. Bernard DECAUX, Emile FROMY et Pierre GAMET, de l'aide qu'ils nous ont apportée dans la préparation de cet article.

M. DOIREAU

Adjoint au Directeur
du Commissariat
à l'Energie Atomique

L'électronique nucléaire

1. Rappel historique (1895-1940)

C'est en 1895 que Roëntgen, étudiant les phénomènes présentés par un tube de Crookes, découvrit un rayonnement auquel, ignorant sa nature, il donna le nom de rayonnement X et qui présentait les propriétés remarquables de traverser le verre (contrairement aux rayonnements ultraviolets), le papier noir (à l'encontre des rayons du spectre visible), de rendre fluorescent le platinocyanure de baryum. On reconnut bientôt que les rayons X présentaient un certain nombre de propriétés intéressantes telles que : impressionner la plaque photographique ou ioniser les gaz. Cette dernière propriété permit de mesurer l'intensité d'un faisceau de rayons X en prenant, pour cette mesure, l'intensité du courant circulant dans une chambre d'ionisation fonctionnant dans des conditions déterminées et traversée par le faisceau. On peut voir dans cet appareillage (fig. 1), l'ancêtre de l'instrumentation nucléaire qui devait, par la suite, singulièrement se compliquer.

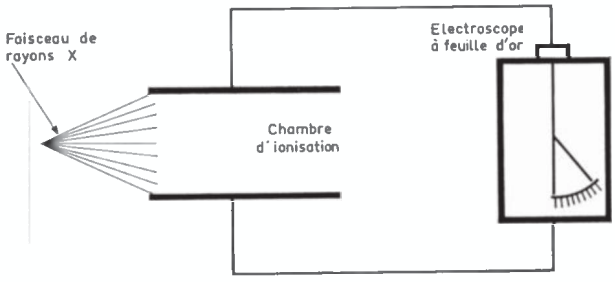


FIG. 1.

Une autre date importante à retenir est l'année 1896 où Henri Becquerel, professeur au Muséum d'Histoire Naturelle, découvrit la radioactivité des sels d'uranium alors qu'il étudiait la phosphorescence. Il constata, en effet, que des plaques photographiques étaient impressionnées en l'absence de lumière, soit par un sel fortement phosphorescent : le sulfate double d'uranyle et de potassium, soit par des sels d'uranium non phosphorescents ou par l'uranium métallique. Il considéra les « rayons uraniques » qu'il venait de découvrir comme un phénomène de l'ordre d'une « phosphorescence invisible » de longue durée. Rutherford montra que ces rayons pouvaient décharger les corps électrisés et il les divisa en deux types distincts : les rayons alpha facilement absorbés par la matière et les rayons bêta plus pénétrants (1899). Peu de temps après, P. Villard, en examinant le rayonnement du radium, découvrit un troisième type de rayons encore plus pénétrants, ce sont les rayons gamma (1900).

Cependant dès 1897, Marie Curie avait entrepris, à l'Ecole de Physique et de Chimie, où son mari Pierre Curie était professeur de physique, une série de recherches dans le but de se rendre compte si les propriétés de l'uranium se retrouvaient dans d'autres corps. Au lieu d'utiliser la méthode photographique, purement qualitative, Marie Curie institua une méthode électrique quantitative qui lui permit de comparer le courant d'ionisation dû au rayonnement d'une surface donnée d'oxyde d'uranium à celui dû à la même surface de la matière examinée. Les courants d'ionisation étaient mesurés par la méthode du quartz piézoélectrique. Ces mesures permirent de constater que les minéraux utilisés : la pechblende (oxyde d'uranium) et la chalcolite (phosphate double de cuivre et d'uranyle) étaient beaucoup plus actifs que l'uranium lui-même et qu'ils devaient, en conséquence, contenir un élément inconnu différent de l'uranium. Le 18 juillet 1899, Pierre et Marie Curie annonçaient l'existence d'une nouvelle substance « radioactive » qu'ils appelleront « polonium ». Enfin, le 26 décembre 1898, à la suite des

traitements chimiques de la pechblende, ils purent annoncer à l'Académie des Sciences, la découverte du radium, suivie peu de temps après par celle de l'actinium (A. Debierne). Parmi les expériences qui furent alors montées pour étudier les propriétés des rayonnements, on peut citer celle qui permit de montrer la structure corpusculaire du rayonnement alpha : dans un appareil appelé spinthariscope (1), on introduit une parcelle de radium qui provoque sur un écran au sulfure de zinc des scintillations observées à la loupe (fig. 2).

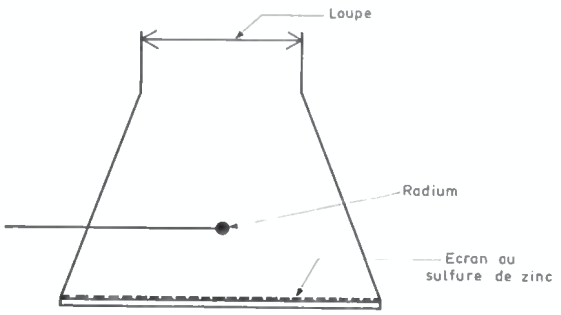


FIG. 2.

En 1908 Regener utilisa cette méthode optique pour compter le nombre de particules alpha émises, pendant un temps donné, par une masse donnée de radioélément, tandis que Rutherford et Geiger réussissaient également à dénombrer les particules alpha par une méthode électrique dans laquelle l'appareil de mesure était un électromètre. Cette méthode perfectionnée par Geiger (1913) puis Geiger et Müller (1928), conduisit à établir un « compteur à pointe » d'une grande sensibilité (fig. 3). Les deux méthodes permirent d'obtenir les mêmes résultats, à savoir qu'un gramme de radium produit $3{,}7.10^{10}$ particules alpha par seconde.

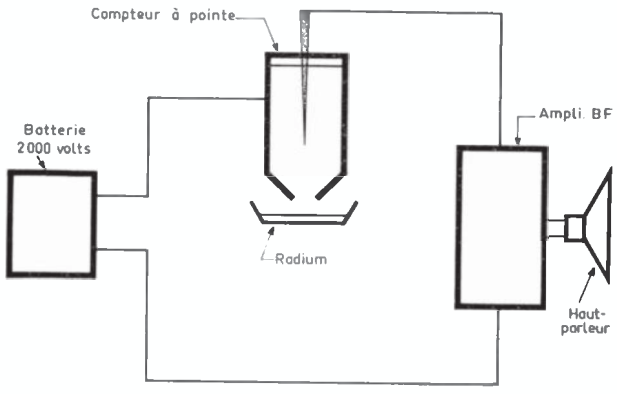


FIG. 3.

Une troisième méthode permit de visualiser la trajectoire des particules. C'est celle dite de la chambre de Wilson (1912) : une préparation contenant du radium était placée au voisinage d'un espace E contenant de l'air saturé de vapeur d'eau (fig. 4). Quand on déplace brusquement le piston mobile, l'air se refroidit et la vapeur d'eau se trouve sursaturée. Le passage des particules ionisantes provoque sa condensation sous forme de fines gouttelettes permettant ainsi d'enregistrer le sillage de chacune des particules. La détente peut aussi être obtenue par une grande soupape dont l'ouverture permet au gaz comprimé dans la chambre de s'échapper brusquement à l'air libre.

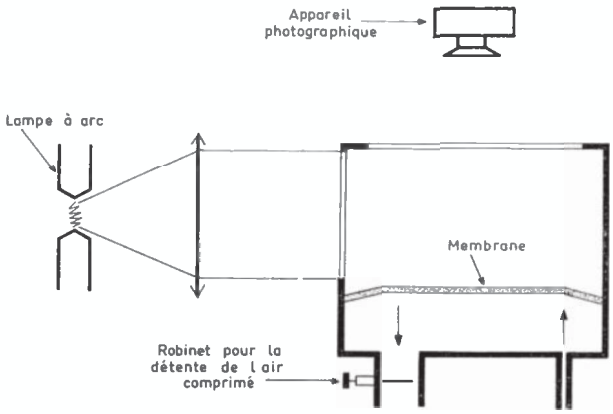


FIG. 4.

Si la chambre de Wilson utilisée seule ou avec des tubes compteurs en coïncidence a été l'instrument de choix pour l'étude des rayons cosmiques, ces derniers ont été découverts en 1912 par l'Autrichien Hess, grâce à un montage comprenant chambre d'ionisation et électromètre.

Le rappel de quelques dates qui ont jalonné l'évolution des recherches nucléaires avant la seconde guerre mondiale ne peut enfin omettre la découverte en 1933 de la radioactivité artificielle par Frédéric Joliot et Irène Curie dans une expérience où, lors de l'exposition d'une feuille d'aluminium à une source de polonium, se produisait un isotope radioactif du phosphore que l'on ne connaissait pas dans la nature. Cette expérience mettait en œuvre une instrumentation des plus simples : tube compteur de Geiger-Müller, amplificateur (éléments d'un récepteur radio), compteur numérique (fig. 5).

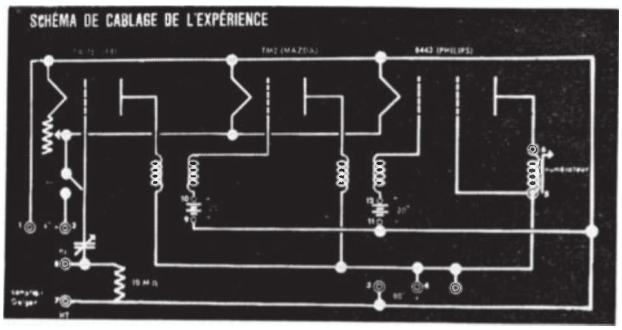


FIG. 5.

L'ensemble de ces travaux auxquels il faut ajouter la réalisation de la première transmutation nucléaire à l'aide de particules accélérées artificiellement par Cokroft et Walton en Angleterre (1930), la découverte du neutron par Chadwick en 1932 et de la

(1) Littéralement « vision d'étincelles ».

fission du noyau atomique par Hahn et Strassmann en 1939, devait conduire tout naturellement à la prise des brevets qui sont à la base des applications nucléaires de grande envergure en mars 1939 par F. Joliot, Halban et L. Kowarski au Collège de France. Ils constatent que la fission de l'uranium provoquée par un seul neutron s'accompagne, outre la formation de deux produits de fission avec la libération d'énergie correspondante, de l'émission de plusieurs neutrons, susceptibles, eux aussi, de provoquer de nouvelles fissions. Il fallait cependant attendre février 1942 pour que soit montée à Chicago par E. Fermi la première pile expérimentale aux Etats-Unis qui divergea le 2-12-42, et le 15-12-48 pour que diverge en France, au Fort de Châtillon, la première pile française ZOE (pile de puissance *Z*éro, à *O*xyde, modérée à l'*E*au lourde).

2. Les accélérateurs de particules

Avant d'aborder le domaine proprement dit de l'électronique nucléaire, il convient également de rappeler l'évolution des accélérateurs de particules qui, au même titre que les piles, ont été une des causes essentielles du développement de l'instrumentation nucléaire. C'est au début des années 1930 que l'on vit se réaliser les premiers accélérateurs de particules, premiers éléments de ce que l'on a pu appeler « l'artillerie nucléaire » : en 1930 l'accélérateur Cockroft-Walton (protons) déjà mentionné, en 1931 le premier générateur électrostatique utilisable de Van de Graaff et en 1932 le premier cyclotron de Lawrence. Ces machines allaient permettre de disposer en laboratoire de sources de particules dont l'énergie de plus en plus élevée permet de forcer les « défenses électriques » des noyaux atomiques et de produire ainsi, à volonté, des réactions nucléaires que l'on n'aurait pu observer autrement qu'avec les rayons cosmiques dans des conditions beaucoup plus difficiles et beaucoup plus aléatoires. Il ne saurait être question de donner en détail toutes les caractéristiques des machines qui ont été construites dans les différents pays, mais comme pour les réacteurs, c'est après la dernière guerre que sont apparues les machines qui ont permis de faire un pas considérable dans la connaissance de la structure de la matière et qu'ont pu être découvertes les particules élémentaires dont certaines avaient été prévues théoriquement avant qu'elles aient pu être effectivement mises en évidence (positrons, neutrino, etc.) ou qu'ont pu être produites des particules de durée éphémère (mésons), découvertes à l'état libre dans les rayons cosmiques.

Les caractéristiques des principales machines construites depuis 1945 montrent l'évolution et la course pour chaque type vers des puissances de plus en plus élevées ou des débits de plus en plus importants :

Cyclotrons : accélération de particules (protons ou ions lourds) à des énergies pouvant aller jusqu'à 30 MeV. Deux cyclotrons, dont un à énergie variable, sont installés au CEN-Saclay. Les synchrocyclotrons permettent d'atteindre des énergies plus élevées (600 MeV au CERN).

Accélérateurs linéaires d'électrons : les deux plus récents en France ont été construits par la Compagnie Générale de TSF (CSF) à Orsay (énergie maximale 2,3 GeV, longueur : 230 m, 50 impulsions de 1,7 µs/s, courant de crête : 60 mA) et à l'Ormes-des-Merisiers en 1968 (énergie maximale 600 MeV, longueur : 185 m, 1 000 impulsions de 10 µs, courant de crête : 60 mA). Le record pour ce genre d'appareil est détenu par l'accélérateur linéaire de Stanford (1967) avec une énergie maximale de 40 GeV, une longueur de 3 000 m, 360 impulsions de 1 µs/s et un débit de 10 mA.

Synchrotrons : le premier appareil de ce type construit en France en 1958 sous la responsabilité du CEA permettait d'accélérer des protons jusqu'à une énergie de 3 GeV (Saturne). Diverses améliorations ont été apportées récemment à cette machine pour améliorer la qualité du faisceau et porter de 3.10^{11} à 6.10^{11} le nombre de protons accélérés par cycle. Parmi les autres synchrotrons, il y a lieu de citer l'accélérateur du CERN (28 GeV), celui plus récent de Serpoukov (70 GeV) ainsi que la réalisation en cours aux Etats-Unis à Weston (200-400 GeV) ou projetée au CERN (300 GeV).

L'introduction des anneaux de collision où entrent en collision les particules de deux faisceaux tournant en sens contraire permet d'obtenir encore des énergies disponibles pour les interactions qui sont approximativement le double des énergies fournies aux particules. Ce dispositif produit les mêmes effets que des chocs, sur cibles fixes, de particules d'énergie de 50 à 1 000 fois supérieure. De tels dispositifs existent auprès d'un certain nombre d'accélérateurs à Stanford, Orsay et récemment au CERN, etc. où l'énergie des faisceaux de base est 28 GeV et l'énergie équivalente lors de la collision de l'ordre de 1 700 GeV.

3. Domaine de l'électronique nucléaire

Le domaine de l'électronique nucléaire découle tout naturellement de ce qui précède : limité avant 1940 aux études faites en laboratoire sur les radioéléments et le rayonnement cosmique, il s'est depuis considérablement élargi avec le passage à l'âge industriel de l'énergie atomique et la mise en service d'accélérateurs de particules de plus en plus puissants. Il comprend non seulement l'équipement de base des différents laboratoires (détecteurs, échelles de comptage, spectromètres, etc.), mais encore toute l'électronique nécessaire pour la conduite des machines et la réalisation d'expériences de plus en plus complexes, mettant en œuvre des dizaines, voire des centaines, de détecteurs et des ensembles de traitement d'information très élaborés. De même, le développement des centrales électronucléaires a conduit à étudier et réaliser tout le matériel permettant de rechercher, d'exploiter les gisements uranifères et de préparer les combustibles nucléaires.

Le contrôle des piles atomiques a nécessité de mettre au point des chaînes de mesure spécialisées et tous les automatismes qui assurent le contrôle de la puissance, ainsi que la sécurité des installations (en particulier détection de rupture de gaine) et des personnes. Un effort spécial a été consenti sur ce dernier point et tout un arsenal de moyens est à la disposition des travailleurs ainsi que des services chargés d'assurer la protection des populations pour leur permettre de contrôler que l'irradiation ou les risques de contamination auxquels ils peuvent être soumis est inférieure aux normes établies. Enfin, les applications des radio-éléments à la recherche, l'industrie, la médecine, l'agriculture... ont également conduit au développement d'une instrumentation spécifique dont les débouchés sont en grande expansion.

Une partie importante des études concernant le domaine atomique a été entreprise par le Commissariat à l'Energie Atomique créé par l'Ordonnance du 18 octobre 1945, mais de nombreux laboratoires de l'Université et du CNRS ont poursuivi des travaux entamés dans le cadre de l'Université avant la dernière guerre et ont contribué de façon importante au développement des techniques nucléaires, notamment à Paris (Institut du Radium, Collège de France, etc.), Lyon, Orsay, Strasbourg, Toulouse.

3.1. Les détecteurs

L'instrumentation électronique utilisée dans le domaine nucléaire est caractérisée par le fait qu'en général un appareil comprend un ou plusieurs détecteurs nucléaires qui fournissent des informations sous forme de signaux électriques. L'électronique associée doit permettre le traitement de ces informations qui sont aussi diverses que : absence ou présence d'un rayonnement, intensité (comptage pendant un certain temps, débit moyen par unité de temps), nature, instant d'apparition, coïncidence entre plusieurs événements, etc. Les informations d'existence, de temps et d'énergie existent en effet à l'état potentiel dans les signaux fournis par les détecteurs. Les progrès enregistrés dans le domaine de l'instrumentation nucléaire se présentent de façon discontinue et sont liés d'une part aux progrès des détecteurs et, d'autre part, aux progrès de l'électronique. C'est pourquoi nous nous arrêterons d'abord à l'évolution des détecteurs nucléaires.

Si les chambres d'ionisation compteurs proportionnels, compteurs Geiger-Müller continuent à être largement utilisés, en particulier pour la radioprotection et la radioprospection, ils ont relativement fait peu de progrès et l'électronique qui leur est associée est en général simple et rustique. De même, nous ne nous pencherons pas sur les détecteurs à traces (chambres de Wilson, chambres à bulles) qui sont devenues de plus en plus complexes mais ne mettent pas en œuvre directement de l'instrumentation électronique. Ce sont en effet les détecteurs à scintillation (scintilleurs) vers 1949, puis les détecteurs semiconducteurs (semicteurs) vers 1960, qui ont permis les progrès les plus spectaculaires de l'électronique nucléaire et ont renouvelé complètement la physique nucléaire en permettant de passer brusquement pour les mesures, du domaine de la microseconde qui était celui que permettaient les compteurs de Geiger-Müller, à celui de la nanoseconde.

Les détecteurs à scintillation sont formés par l'association d'un scintillateur organique, soit en solution, soit cristallisé (stilbène, anthracène) ou d'un scintillateur minéral (cristal de iodure de sodium activé au thallium) et d'un photomultiplicateur. Les constantes de temps de scintillation pour les premiers sont de l'ordre d'une dizaine de nanosecondes et de l'ordre de la microseconde pour les seconds. Ils ont, par rapport aux tubes compteurs de Geiger-Müller, l'avantage d'avoir un temps de résolution beaucoup plus faible, de détecter des particules dans un volume plus important, d'avoir un bon rendement de détection principalement pour les rayons gamma et de fournir des impulsions dont l'amplitude est proportionnelle à l'ionisation, donc à l'énergie des particules.

En ce qui concerne les détecteurs semiconducteurs, si l'on peut considérer que les premières réalisations sont à l'actif de MacKay aux Laboratoires Bell en 1949 (détection des particules α de ^{210}Po avec des diodes au germanium à pointe, puis à jonction N-P), en fait, le véritable développement commença vers 1960, tant avec le germanium qu'avec le silicium comme matériaux de base. S'il faut une énergie de l'ordre de 30 eV pour créer une paire électron-ion dans la plupart des gaz, c'est seulement 3 eV qu'il faut pour créer une paire électron-trou dans un semiconducteur tel que le germanium ou le silicium. Dans des conditions comparables, les semicteurs fournissent donc dix fois plus de charges libres. Ils ont également une grande efficacité de détection pour les particules chargées de grande énergie. Ils sont de deux types différents : les compteurs à jonction N-P et à barrière de surface, les diodes NIP réalisées avec du germanium ou du silicium compensés au lithium. Les semicteurs, principalement ceux au germanium compensé au lithium destinés à la spectrométrie γ, ont fait des progrès considérables : on peut facilement obtenir des détecteurs de grand volume (100 cm^3) permettant une résolution sur les pics de 1 MeV du cobalt 60, inférieure à 2 keV. De même, avec des montages électroniques appropriés (préamplificateurs ayant un transistor à effet de champ sélectionné à faible bruit et une contre-réaction optoélectronique) et à la température de l'azote liquide, on peut obtenir, pour un rayonnement X de faible énergie, une résolution de l'ordre de 160 eV (raie K alpha du manganèse). Les semicteurs présentent en outre l'avantage de recueillir des informations précises sur l'instant d'apparition des particules.

Dans le domaine de la physique des hautes énergies est enfin apparue toute une gamme de détecteurs (chambres à étincelles automatiques, chambres à fils proportionnelles) qui permettent de recueillir des informations à la fois sur le trajet des particules, leur instant d'apparition et leur énergie. Ils sont constitués par des systèmes comportant plusieurs dizaines de milliers de fils. Chaque fil constitue un détecteur indépendant qui peut être localisé en repérant le fil parcouru par un courant au moment où l'événement ionisant déclenche une étincelle. Ces

détecteurs sont appelés à un grand avenir pour la physique des hautes énergies.

Pour la commande et le contrôle des réacteurs, toute une gamme de détecteurs spéciaux a vu le jour pour la mesure des flux de neutrons en présence d'un important rayonnement gamma : ce sont les chambres d'ionisation compensées fonctionnant en courant, les chambres d'ionisation à fissions, d'une part, utilisées de façon courante en régime de marche normale du réacteur, et les compteurs proportionnels à BF3 ou dépôt de bore, d'autre part, qui sont utilisés pendant la période de démarrage. Les progrès recherchés consistent à améliorer la sensibilité aux neutrons et l'étendue de mesure (de l'ordre de 8 à 10 décades), ainsi que la tenue à des températures et à des flux gamma de plus en plus élevés, de façon que les détecteurs puissent fonctionner sans avoir trop à les éloigner du cœur du réacteur.

Enfin, dans le domaine de la radioprotection, on peut sginaler la réalisation de plus en plus répandue de chambres d'ionisation dont la paroi est constituée d'un matériau dont la réponse aux rayonnements est sensiblement équivalente à celle des tissus humains.

3.2. L'acquisition des informations

Les signaux électriques fournis par les détecteurs contiennent tous les renseignements relatifs aux particules détectées. Il appartient à l'électronique proprement dite de traiter ces informations et de les restituer sous une forme adéquate à l'utilisateur : on ne se borne plus en effet, depuis de nombreuses années, à compter les événements, mais on cherchera à préciser la nature des radiations, leur énergie, leur distribution spatiale et temporelle, etc. Cette nécessité a conduit à développer un ensemble de plus en plus complexe d'appareils qui ont tous la caractéristique de traiter des signaux ayant un caractère aléatoire, lié à la nature même des événements nucléaires. Un certain nombre d'analogies existent avec le radar qui, à l'origine, a bénéficié, dans une certaine mesure, des techniques de traitement d'impulsions, familières aux physiciens nucléaires. Selon le type d'information à fournir et le type de détecteur, des appareils ou des circuits spécifiques ont été mis au point :

— *Information d'existence :* on s'intéresse seulement à la présence ou à l'absence d'un rayonnement. Les opérations effectuées, après une mise en forme des impulsions, consistent alors soit à compter le nombre de particules ayant fourni un signal (échelle de comptage), soit à mesurer le nombre de particules par unité de temps (opération appelée improprement intégration). A ces fonctions de base peuvent s'ajouter le comptage pendant un temps donné ou la mesure du temps au bout duquel un nombre d'impulsions prédéterminé aura été atteint. Ces taux de comptage, qui étaient autrefois limités par les possibilités des compteurs électromécaniques, sont couramment de l'ordre de 10 MHz et peuvent atteindre jusqu'à 500 MHz, voire 1 000 MHz. Une échelle, qui était constituée d'un châssis (fig. 6) dans la technique de 1945 à 1950, est maintenant réduite à un élément

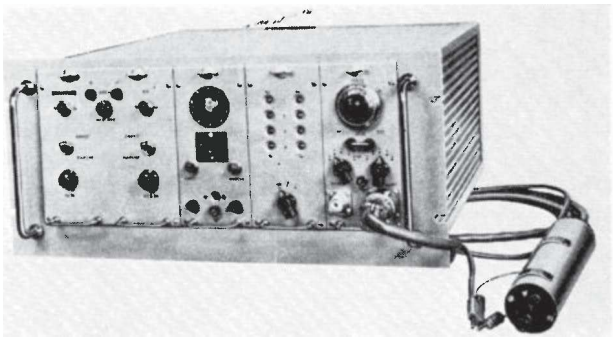


FIG. 6.

fonctionnel occupant 1/24 de châssis, la place la plus importante étant réclamée par les boutons de commande et les dispositifs d'affichage (fig. 7).

— *Informations sur l'énergie :* pour un certain nombre de détecteurs, nous avons vu que le signal électrique obtenu est proportionnel à l'énergie de la particule incidente. Il convient, par conséquent, dans le traitement du signal, de conserver cette proportionnalité, quels que soient le rapport signal/bruit et le taux de comptage. Toute une gamme d'appareils répond à ce critère : amplificateurs proportionnels, discriminateurs et sélecteurs d'amplitude, spectromètres, analyseurs multicanaux. Ces derniers appareils sont de plus en plus répandus et ont de nombreuses applications hors du domaine nucléaire : ils comprennent une mémoire à tores magnétiques comportant plusieurs centaines ou plusieurs milliers de canaux, chaque signal appliqué à l'appareil est transformé en un train d'impulsions périodiques dont le nombre N est proportionnel à l'amplitude du signal. Le canal de rang N est alors sélectionné par une échelle d'adresse et enregistre une unité. Chaque canal peut ainsi enregistrer de l'ordre de 10^5 à 10^6 coups. Le contenu de la mémoire peut être visualisé sur un oscilloscope qui donne ainsi une image du spectre analysé. Les informations de la mémoire sont également disponibles pour enregistrement sur un dispositif approprié (bande imprimée, bande perforée, bande magnétique, etc.).

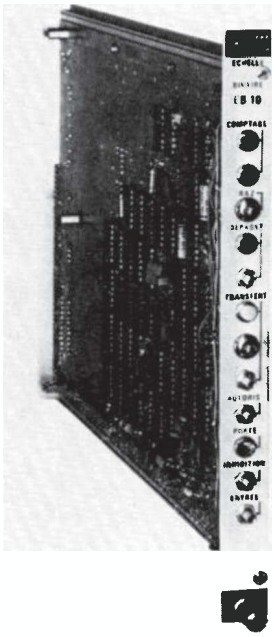


FIG. 7.

C'est à l'occasion de ce type de mesure que l'on peut sans doute situer le mieux l'évolution de l'instrumentation nucléaire depuis 25 ans : le premier

appareil comprenait un amplificateur et deux discriminateurs réglés à la main, permettant de définir la fenêtre d'analyse de l'amplitude, puis on a imaginé le spectromètre à bande défilante (à la main ou mécaniquement) dans lequel la largeur de la fenêtre d'analyse était fixée, la fenêtre étant ensuite déplacée tout le long du domaine d'analyse. Les premiers analyseurs multicanaux comprenaient 25 et jusqu'à 50 canaux, l'enregistrement des impulsions dans chaque canal se faisant sur un compteur numérique précédé d'une ou deux décades (fig. 8). L'utilisation des mémoires à tores permit ensuite d'augmenter le

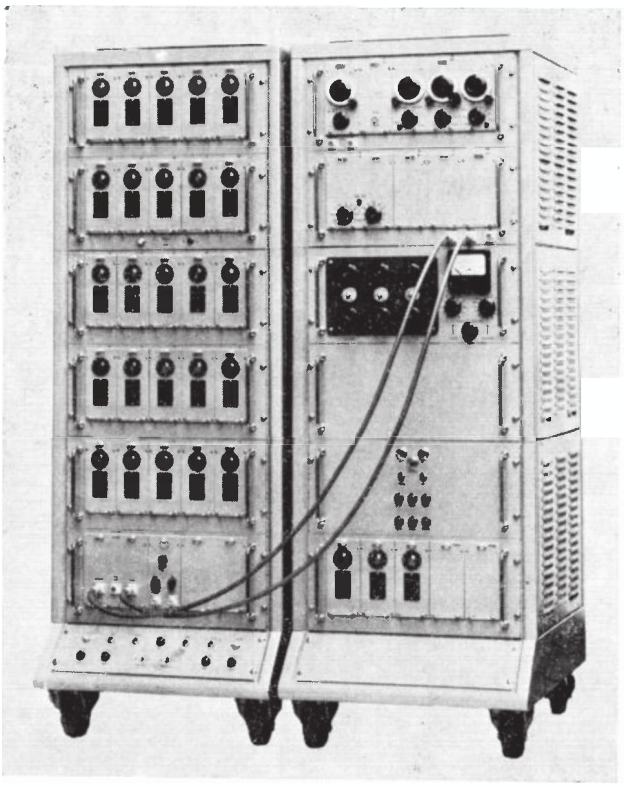


FIG. 8.

nombre des canaux (100 puis 200) dans la technique à tubes, puis à 400 dans la technique à transistors. Actuellement les analyseurs utilisés en particulier pour la spectrométrie gamma avec semicteur comportent jusqu'à 4 000 canaux (fig. 9), un convertisseur de fréquence à 20 MHz ou 100 MHz, et ont comme performances une linéarité meilleure que 1 % et une linéarité intégrale meilleure que 1 $^0/_{00}$. Enfin, un calculateur associé à l'analyseur permet le traitement automatique du spectre mis en mémoire dans l'analyseur (calibration, lissage, soustraction du bruit de fond, abscisse d'un pic, aire sous un pic, activité, etc.).

— *Information sur la nature du rayonnement :* on a pu montrer que le temps nécessaire à une impulsion pour atteindre un niveau donné, dépend de l'énergie et du type de particule. De même, le temps de décroissance de la scintillation dans un scintillateur est différent selon qu'il s'agit d'un photon

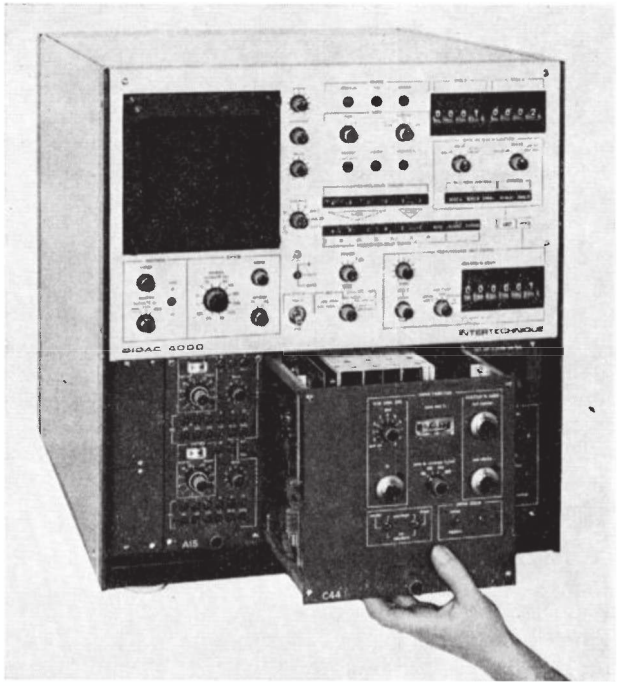


FIG. 9.

gamma ou d'un neutron. On a donc pu baser sur ces principes différents dispositifs permettant de définir la nature du rayonnement incident et de discriminer entre les informations provenant de divers types de particules, dans le cas d'un rayonnement complexe. De même, une relation existe entre l'énergie d'une particule (E), la perte d'énergie par unité de longueur dans un milieu donné ($E/\Delta x$), le parcours et la nature de la particule. Le produit $E \times E/\Delta x = P_0$ dépend de l'énergie incidente, mais donne une séparation satisfaisante entre différents types de particules dans un domaine restreint d'énergie.

— *Informations liées à des mesures de temps :* les renseignements recherchés sont l'instant d'apparition ou de disparition d'une particule, la simultanéité de deux ou plusieurs événements (coïncidence), l'apparition d'un événement en l'absence d'autres (anti-coïncidence). On aura ainsi, le plus souvent, à localiser dans le temps un événement par rapport à un autre, pris pour référence, qu'il s'agisse, pour ce dernier, d'un signal lié à la détection d'une particule ou d'un signal synchrone lié, par exemple, au cycle de fonctionnement d'un accélérateur pulsé. Les mesures de temps peuvent actuellement être faites avec des précisions de l'ordre de 10 ps, grâce aux composants nouveaux qui ont permis de faire progresser considérablement les performances de l'électronique rapide et de gagner un facteur de près de 10 000 pour les temps de résolution, en moins de 25 ans.

3.3. Le traitement des informations

La plupart des appareils mentionnés ci-dessus fournissent des informations à l'état brut, un grand nombre d'entre eux sont réunis autour d'une seule

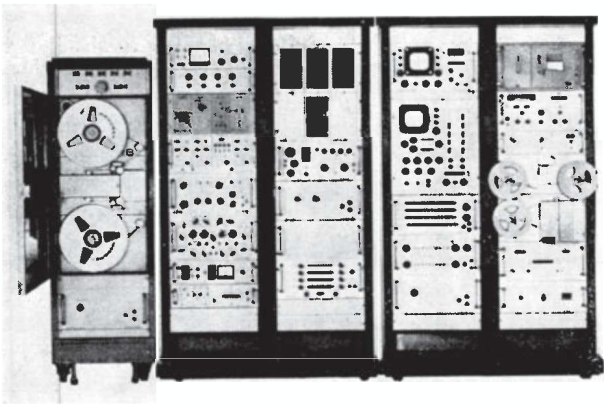


FIG. 10.

expérience montée auprès d'une grande machine ou fournissent les éléments nécessaires à la conduite de cette machine ou d'un réacteur. La complexité croissante de ces ensembles avait conduit, il y a dix ans, à les regrouper et à les commander dans des unités telles que des ensembles d'analyse multiparamétrique (fig. 10), où les différentes opérations logiques faisaient l'objet d'un programme câblé. L'apparition sur le marché des petits calculateurs n'a pas manqué d'inciter les utilisateurs à les introduire en grande quantité dans les installations en profitant de leur souplesse d'utilisation, à la fois pour contrôler le déroulement des expériences ou du fonctionnement des machines et pour effectuer un prétraitement des informations qui donne à l'utilisateur tous les éléments nécessaires (visualisation notamment) pour s'assurer que les résultats obtenus sont conformes aux prévisions ou pour modifier sans délai certains paramètres relatifs à l'expérience en cours. On peut rappeler que l'un des premiers calculateurs ainsi utilisé l'a été pour le traitement des informations et la commande des installations de détection de rupture de gaine sur la centrale EDF 1 à Chinon en 1960. L'automatisation et le traitement numérique des informations ont conduit à développer toute une série d'appareils : convertisseurs analogique-numérique, codeurs, interfaces entre appareils et calculateurs, unités spécialisées de visualisation, etc., qui ont encore élargi le domaine strictement réservé à l'électronique nucléaire.

4. Développement industriel

En 25 ans, plusieurs générations de matériels se sont succédées : pour le matériel d'emploi courant, le CEA avait imaginé un système à base de tiroirs interchangeables, réalisant chacun une ou plusieurs fonctions. Leur évolution peut symboliser celle de l'électronique nucléaire : la première génération était constituée d'électronique à tubes dont l'échelle de 1 000 (fig. 6) donne l'illustration, chaque châssis pouvant recevoir cinq tiroirs élémentaires. La seconde génération a été basée sur l'utilisation des transistors (puis des circuits intégrés) et a été établie selon les normes européennes ESONE. Il s'agit du système RENATRAN dont l'équivalent américain est le système NIM. Chaque châssis peut recevoir huit tiroirs élémentaires (fig. 11). Pour chacune des deux premières générations, une cinquantaine de types de tiroirs fonctionnels a été réalisée et commercialisée. Ils ont permis de résoudre la plupart des problèmes

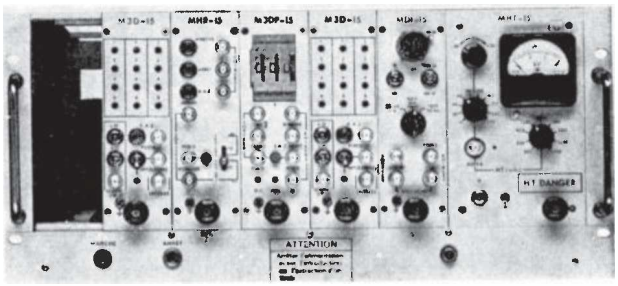


FIG. 11.

courants posés par les différents utilisateurs. Ont été également traités des problèmes ne justifiant pas l'utilisation d'un calculateur tels que la concentration des informations numériques disponibles dans les appareils de mesure et leur transfert vers des unités d'enregistrement (machines imprimantes, bandes magnétiques...). La troisième génération de tiroirs fonctionnels est en cours de diffusion. Elle est conforme aux spécifications internationales adoptées par la plupart des laboratoires européens et américains sous le nom de CAMAC (1) et a été conçue de telle sorte qu'un ensemble de châssis et de tiroirs puisse être connecté à un calculateur numérique qui commande les différentes séquences et vers lequel se fait le transfert des informations. Chaque châssis peut recevoir 25 tiroirs élémentaires (fig. 12).

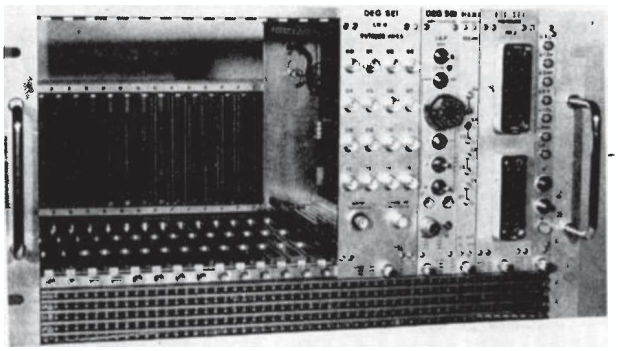


FIG. 12.

Pour des applications particulières, deux autres standards modulaires ont également été développés, l'un pour l'électronique rapide (dont divers éléments se retrouvent dans le standard Rénatran) et l'autre pour le contrôle des réacteurs et des usines (standard multibloc (fig. 13).

Le développement industriel de l'instrumentation nucléaire a commencé en France vers 1955 et l'industrie a été très rapidement en mesure de faire face,

(1) Système d'instrumentation modulaire pour le traitement des informations. Document Euratom EUR 4100 f.

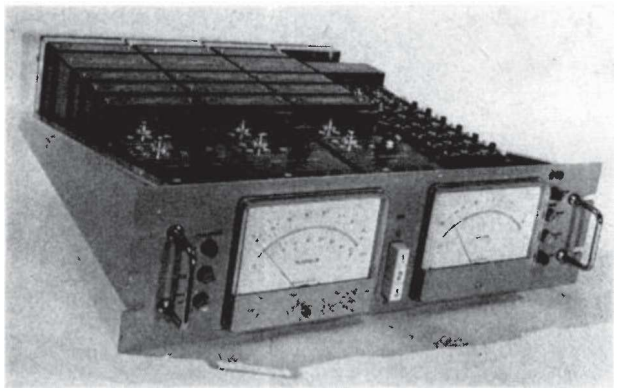


FIG. 13.

avec le concours du CEA, aux besoins importants qui apparaissent en France, du fait du développement rapide des Centres d'Etudes Nucléaires et des diverses applications de l'énergie atomique. Le chiffre d'affaires hors taxes réalisé par l'industrie se situe aux environs de 200 millions de francs (HT) dont 10 % à l'exportation. De plus, d'après les statistiques douanières, les exportations l'emportent sensiblement sur les importations. Il faut d'ailleurs noter que le matériel initialement étudié pour des applications nucléaires (analyseurs multicanaux) trouve de plus en plus d'utilisations hors de ce domaine.

5. Publications. Congrès

De nombreuses publications concernant l'électronique et l'instrumentation nucléaires ont été faites, d'une part dans les Bulletins d'Instrumentation Nucléaire du CEA, d'autre part dans *L'Onde Electrique* qui a, indépendamment de nombreux articles séparés, consacré depuis 1955 quatorze numéros spéciaux à ce sujet. On en trouvera la liste en annexe.

Par ailleurs, la Société Française des Electroniciens et des Radioélectriciens a participé activement à l'organisation d'un certain nombre de Congrès Internationaux sur l'électronique nucléaire qui ont réuni chaque fois près d'un millier de participants : en septembre 1958 et septembre 1963 à Paris, en septembre 1968 à Versailles. Elle a également apporté son concours à un certain nombre de journées techniques sur l'électronique nucléaire rapide à Grenoble, tandis que sa 11e section : électronique nucléaire et corpusculaire organisait depuis 1955 de nombreuses conférences ou demi-journées de discussions.

6. Conclusion

L'électronique nucléaire classique a atteint, en moins de quinze ans, un niveau de perfectionnement important et elle est en mesure de résoudre pratiquement tous les problèmes qui se posent, en tirant le meilleur parti des détecteurs existants. Dans certains domaines, notamment la spectrométrie, on atteint presque les limites « physiques » au-delà desquelles un perfectionnement ne serait plus significatif. Un nouveau pas en avant ne sera possible que si l'on découvre de nouveaux types de détecteurs. De même, la distinction qui était faite entre électronique classique et électronique rapide tend à s'estomper, ce qui n'exclut pas que des progrès en rapidité et précision (notamment pour les mesures de temps) ne soient pas encore réalisables en exploitant les possibilités de l'optoélectronique ou des techniques nouvelles (effet Gunn, effet Josephson, etc.).

L'importance des moyens mis en œuvre dans les grands pays pour promouvoir depuis la dernière guerre les recherches nucléaires et leurs applications militaires et pacifiques ont contribué à faire de l'électronique nucléaire une électronique de pointe dont les applications finissent par déborder très largement le domaine nucléaire. En conséquence, il serait temps de ne plus lui réserver le qualificatif de nucléaire, mais de considérer cette électronique et cette instrumentation comme ayant une vocation scientifique générale. La question avait été débattue lors d'une table ronde tenue à Ispra le 9 mai 1969 et organisée par Euratom : les termes anglais tels que « Metronics » et « Scientronics » avaient été proposés parmi de nombreux autres. Le problème de la meilleure dénomination reste ouvert.

ANNEXE

Numéros spéciaux de *L'Onde Electrique* consacrés à l'électronique ou à l'instrumentation nucléaires :

N° 343, octobre 1955 :
Energie nucléaire : piles atomiques et radioisotopes.

N° 344, novembre 1955 :
Energie nucléaire : accélérateurs de particules et appareils de physique nucléaire.

N° 377-378, août-septembre 1958 :
L'électronique nucléaire.

N° 387, juin 1959 :
Synchrotron à protons Saturne.

N° 404, novembre 1960 :
Exposés présentés lors d'une journée d'études sur l'électronique nucléaire.

N° 427, octobre 1962 :
L'instrumentation nucléaire.

N° 445, avril 1964 :
Colloque international sur l'électronique nucléaire.

N° 446, mai 1964 :
La recherche universitaire en instrumentation nucléaire.

N° 448-449, juillet-août 1964 :
Contrôle et commande des réacteurs nucléaires.

N° 472-473, juillet-août 1966 :
Colloque sur l'électronique nucléaire rapide.

N° 476, novembre 1966 :
Contribution de l'électronique aux méthodes de traitement statistique des mesures en physique et instrumentation nucléaire.

N° 488 *bis*, novembre 1967 :
Amplification proportionnelle et codage d'amplitude en instrumentation nucléaire.

N° 508-509, juillet-août 1969 :
L'accélérateur linéaire d'Orsay et ses possibilités actuelles.

N° 513, décembre 1969 :
L'accélérateur linéaire de Saclay.

R. DISTEL

Maitre assistant Fac. des Sc. Paris Président de la 12e section de la SFER

C. DEVIMEUX

Directeur à la Dir. Techn. Générale Thomson-CSF

Les applications de l'électricité et de l'électronique en biologie et en médecine

1. Introduction

L'intérêt que les ingénieurs portent à la biologie et à la médecine est important, constant, raisonné. Les problèmes de la santé, de la souffrance, ne laissent personne indifférent ; l'ingénieur est, de plus, curieux des solutions que la nature a trouvées aux problèmes de la vie. Cette curiosité s'est exprimée par l'invention de la « bionique ». Au-delà de ce domaine spéculatif, la médecine et la biologie sont un champ d'application rentable des techniques électriques et électroniques. Il est particulier par ses problèmes, par son public, par ses aspects humains, par son expansion. Certains ingénieurs, curieux des origines de nos connaissances sur l'électricité, remarquent que, dans le passé, la biologie et la médecine ont posé des problèmes, suscité des observations et alimenté, par là, une recherche physique et technique qui n'avait pas encore de dimensions industrielles. Des médecins et des biologistes désertaient plus ou moins leur corps pour aborder ces nouveautés d'un avenir prometteur et où la rigueur avait plus de chances d'être efficace.

L'intérêt que les médecins et les biologistes portent à l'électricité et à l'électronique est en général discret, variable, intuitif. Ils y voient des instruments coûteux, puissants, délicats, encombrants, dont on peut espérer beaucoup s'ils sont bien utilisés, sans jamais atteindre des solutions définitives, et dont on doit tout craindre s'ils sont utilisés d'une manière imprudente, systématique, inintelligente.

En médecine comme aussi en recherche biologique, du fait d'un retard dans le développement des techniques, on est paradoxalement orienté, spécialisé, limité dès sa formation par le bagage dont on est pourvu et qui sera difficilement renouvelé. Il y a quelques années, les laboratoires où l'électronique était implantée, l'entretenaient avec une ferveur qui n'était pas toujours sans naïveté. Ceux qui l'ignoraient, méprisaient la confusion des techniques. Un enthousiasme récent a renversé la tendance ; il peut être enrichissant à condition que l'information l'emporte sur la mode et la mesure sur les ambitions et les intérêts particuliers. Mais, de toute façon, pour maîtriser une technique, l'enthousiasme ne suffit pas, il faut la compétence et l'expérience.

Le cinquantenaire de *L'Onde Electrique* peut être l'occasion d'examiner le passé de l'électronique médicale et biologique, l'impact de l'électronique sur la médecine et la biologie et celui de la médecine sur l'électronique.

Comme il est difficile de survoler un domaine aussi divers que celui des applications actuelles, on peut rechercher quels sont ses moyens d'expression, d'enseignement et de recherche.

2. La tradition de l'électronique médicale

On recherchera son passé et le rôle joué par la SFER pour mieux situer ensuite le rôle de l'électronique en médecine et en biologie, et celui de la médecine par rapport à l'électronique.

2.1. Le passé de l'électronique médicale

Au temps où l'homme n'avait pas commencé à s'affranchir des dangers de la nature, la foudre était, plus que de nos jours, familière et redoutable. La

Juillet-août 1971, pp. 657-664

puissance électrique était alors le privilège des dieux. Prométhée osa y prétendre et paya, déjà, de son foie la rançon de ses ambitions.

Le poisson électrique a prêté très tôt son concours. Aristote, Pline, Scribonius, Dioscoride, Galien en font état. La désignation par le même mot « torpedo » de la torpille et de la torpeur est suffisamment évocatrice. Les Arabes ont transmis ces connaissances et l'embryon d'électrothérapie qui en découle.

Dès que le XVIII[e] siècle s'est intéressé à l'électricité, on a pensé qu'elle était bonne pour la santé. L'abbé Nollet présidait aussi la démonstration de ses effets moteurs sur les Gardes royaux et sur les Chartreux. Cette électricité était plus médicale qu'on ne le pense ; on trouve, dès cette époque, des thèses de médecine qui lui sont consacrées. En 1789 paraissait un « Mémoire sur l'électricité médicale » par Jean-Paul Marat. Ce médecin tenait une boutique d'électricité médicale à grand succès et témoignait par ce moyen de son amitié pour le peuple avant de préconiser la mécanique du docteur Guillotin.

On raconte de différentes manières l'histoire de la grenouille qui opposa Galvani et Volta en 1786. Il convient de s'y référer pour la découverte de l'électrogenèse musculaire ; pour celle de l'excitabilité électrique, Swammerdam, l'abbé Nollet et tous les imprudents qui l'ont expérimenté par hasard ou par erreur ont une antériorité certaine. L'électricité médicale n'était qu'un beau titre, la patte galvanoscopique est au contraire un capteur original qui permettait l'abord de l'électrophysiologie.

Entre cette époque et la deuxième guerre mondiale, les découvertes sont denses, imprévues, anarchiques. Elles font diverger l'électricité médicale dans trois directions : les applications thérapeutiques, les applications physiologiques, les grands moyens d'exploration médicale.

La cote des applications thérapeutiques est en baisse, leur diversité s'estompe par des faillites discrètes, alors que l'efficacité augmente. On ne peut recenser les moyens d'efficacité faibles, les traitements illusoires mais agissant par suggestion, et ce qui relève du plus pur charlatanisme. Incontestablement cette dernière catégorie était fort bien représentée au siècle du positivisme. On ne doit pas juger trop sévèrement ces erreurs qui sont encore de notre siècle, tant dans l'illusion que dans l'imposture. Bien plus, si les agents physiques et tous les autres moyens thérapeutiques n'avaient pas été exploités pour des effets prétendus, il n'y aurait jamais eu de médecine. Les effets excito-moteurs ou sédatifs des courants « galvaniques » ou « faradiques », les transports ioniques, l'électrolyse *in vivo* ont été utilisés. L'effet Joule a dû attendre la découverte de la haute fréquence. L'intérêt de ces méthodes s'est estompé de nos jours, mais elles ont occupé des esprits élevés, comme Duchenne de Boulonge qui fut aussi un clinicien méticuleux en neurologie, comme d'Arsonval qui a enrichi les techniques de mesure.

Les applications physiologiques se sont hypertrophiées. Un élève berlinois de Faraday a imaginé le plus fameux des stimulateurs. Tout le monde a vu manipuler « le charriot de Du Bois-Reymond ». Il se fabrique encore et n'a pas changé d'aspect depuis un siècle. Ni les révolutions universitaires, ni les mutations pédagogiques et techniques ne l'ont remisé au musée de la physiologie scolaire. Y a-t-il un autre fossile électrique qui ait survécu ? Dès Magendie, la stimulation électrique était annexée à la physiologie ; Claude Bernard, Marey, l'utilisaient ; Pflüger, Hoorweg, Weiss précisaient des lois qui avec Lapicque devenaient une théorie et une véritable discipline : l'électrophysiologie. Les applications médicales ont une certaine importance. Les successeurs de Lapicque ayant acquis une certaine familiarité avec les phénomènes électriques ont été les premiers à s'intéresser à l'électronique et à ses possibilités. En France, l'électrophysiologie s'est spécialisée dans l'étude du système nerveux et s'est plus attachée aux explications fondamentales qu'aux utilisations pratiques. Les plus importantes de ces dernières nous sont revenues de l'étranger : l'électrocardiographie, l'électroencéphalographie, les « pace-makers », le « monitoring »...

Les découvertes qui nous paraissent les plus importantes ont été fortuites. On ne leur trouve pas de précurseur au XVIII[e] siècle. Elles étaient imprévisibles comme leur développement. C'est le cas de l'électrocardiographie, de la radiologie, de l'électroencéphalographie, de la curiethérapie, de la médecine nucléaire, etc. Certaines sont déjà matière à spécialisation depuis longtemps. Intégrées comme telles dans la médecine, elles s'isolent des autres problèmes de génie médical.

Depuis 1856 l'activité électrique du cœur est connue grâce à la « patte galvanoscopique » de grenouille. L'électromètre capillaire de Lippman a permis des enregistrements sur l'animal (Marey) et sur l'homme (Waller, 1880). Partant du signal mutilé par l'inertie de cet appareil, Einthoven, ayant imaginé l'électrocardiogramme tel que nous le voyons, dut construire le galvanomètre à corde pour l'enregistrer. L'intérêt de la méthode lui a valu une diffusion et une normalisation universelle. Elle l'a aussi figé dans une technique, étonnante pour le début du siècle, mais actuellement périmée. Une méthode nouvelle s'imposera difficilement après avoir fait la preuve d'un meilleur diagnostic.

Peu après la découverte des rayons X, en 1895, la radiographie de la main de Madame Röntgen introduisait la technique dans l'exploration anatomique. Les premiers services de radiologie médicale, l'enseignement de cette discipline apparaissaient avant le début du XX[e] siècle. La radiothérapie naissait quelques années plus tard, en 1921, le lipiodol augmentait les contrastes, on connaissait déjà la radiokymographie et la tomographie. En 1927, apparaissait l'artériographie et en 1934 l'amplification de brillance.

La découverte de la radioactivité est aussi ancienne (Becquerel, 1896). L'utilisation thérapeutique a précédé l'utilisation diagnostique (1928). On conçoit facilement que l'application ait été très prudente et progressive.

L'électroencéphalographie posait des problèmes plus ardus que l'électrocardiographie. L'énergie du

signal est presque mille fois plus faible, son interprétation se complique de composantes aléatoires. Trente années d'effort ont été nécessaires à Hans Berger pour mettre au point une exploration qui aurait été abandonnée sans l'espoir de percer le secret de la pensée et d'atteindre au « supranaturel ».

Certaines techniques se sont imposées rapidement. Pour d'autres, le progrès a été plus lent, parfois il a fallu attendre d'autres découvertes. A la veille de la deuxième guerre mondiale, l'électronique médicale existait virtuellement : les problèmes étaient posés, des solutions étaient connues. L'essor de la technologie devait accélérer le développement et l'industrialisation, faciliter l'expansion.

Entre les deux guerres mondiales, les relations entre la médecine et les techniques étaient à leur niveau le plus bas. Les différentes branches de la connaissance, séparées du tronc commun depuis l'antiquité, avaient démêlé leurs rameaux. Les sciences, les enseignements, les professions s'étaient cloisonnés. On découvrait la spécialisation comme remède à la diversité des tâches ; chacun obtenant dans un domaine étroit le maximum d'efficacité on augmentait ainsi l'efficacité globale. Les appareils destinés à la médecine et à la biologie n'avaient pas d'autre emploi. Leur fabrication et commercialisation devait rester à des entreprises spécialisées autant par leur public que par leurs techniques. Dans le domaine de la recherche, le chercheur construisait ses appareils. Ce n'est donc pas dans un climat d'ouverture nécessaire qu'en septembre 1928 paraissait dans *l'Onde Electrique* un article de Balthazar Van Der Pol sur « le battement du cœur considéré comme oscillation de relaxation ». La publication et la conférence qui l'avait précédée ont néanmoins retenu l'attention. Elles nous ont été signalées trente ans plus tard par des ingénieurs. Après cet événement, les physiologistes considéraient comme définitivement acquis que l'automatisme cardiaque est une oscillation de relaxation. Actuellement on peut penser que les oscillations de relaxation n'expliquent pas l'automatisme cardiaque et que la simulation de l'électrocardiogramme à l'aide de condensateurs ne permet qu'une analogie formelle sans grand intérêt ; en 1928, la conception d'un modèle du générateur électrique cardiaque était en elle-même nouvelle et intéressante. En 1936, paraissait dans l' « Onde Electrique » un autre article sur l'électrocardiographie.

Après la deuxième guerre mondiale, le progrès dans ce domaine est moins lié au génie d'individus isolés ou au hasard de quelques découvertes qu'au développement industriel, au climat, aux tendances générales. Les problèmes sont posés et abordés d'une manière systématique et méthodique. Les découvertes technologiques sont prévues, attendues, exploitées rapidement. Cet obstacle levé, la médecine ne s'est pas laissée envahir sans résistance. Pour s'imposer, une technique doit être « fiable ». Non seulement les pannes retardent, mais elles étouffent l'enthousiasme de l'utilisateur. Il faut aussi que l'intérêt apparaisse d'une manière convaincante, et paradoxalement il faudrait apporter la preuve de l'utilité et de l'efficacité avant d'avoir les premiers résultats. La médecine actuelle dispose de nombreux moyens de diagnostic et de traitement, l'efficacité pharmacologique et chirurgicale est évidente. Dans cet ensemble complexe, une méthode nouvelle a beaucoup plus de difficulté à s'introduire qu'à l'époque où, faute de moyens, toute proposition nouvelle était bien venue. Le médecin, même spécialiste, a beaucoup de difficultés à s'informer des techniques existantes et de leur évolution ; il est aussi submergé de responsabilités, le temps qu'il peut consacrer à sa culture s'amenuise encore du fait qu'il subit, comme le reste de la société, l'invitation aux loisirs et aux activités « extraprofessionnelles ». Le manque d'ouverture n'est pas nécessairement la conséquence d'une mauvaise volonté. Dans ce contexte, les méthodes anciennes se sont épanouies, certaines techniques nouvelles concernant des problèmes sans solution ont

FIG. 1. — Enregistrement synchrone du rythme cardiaque maternel et fœtal.

Le rythme cardiaque est connu depuis l'antiquité. A défaut de la notion précise de fréquence, on le décrivait en termes de métrique poétique, puis de temps musical.

Galilée s'est servi pour décrire le rythme cardiaque d'un pendule qu'on raccourcissait ou allongeait par enroulement sur un tambour. Ce dernier était solidaire d'une aiguille qui indiquait sur un cadran la fréquence en pulsations par minute.

On peut, de nos jours, comparer la fréquence cardiaque à celle de la base de temps d'un oscillographe cathodique dont le faisceau est modulé en intensité par une impulsion obtenue à chaque battement cardiaque.

A partir des potentiels recueillis sur le ventre d'une femme enceinte, on peut avoir simultanément la fréquence cardiaque maternelle et la fréquence cardiaque fœtale. Cette dernière étant deux fois plus rapide que la précédente, la rangée qui lui correspond est deux fois plus dense.

été adoptées ; c'est le cas, par exemple, de la défibrillation cardiaque, de la stimulation permanente du cœur, de la thérapeutique cancéreuse par les accélérateurs de particules. Des efforts ont été tentés pour généraliser des méthodes éprouvées ou pour augmenter leur efficacité, leur fiabilité. Enfin des recherches sont destinées à préparer les techniques de demain. L'industrialisation rendue nécessaire par la difficulté et la complexité ne permet plus l'élaboration de prototypes adaptés aux problèmes ou à la personnalité de chacun. Le biologiste ou le médecin qui s'intéresse à l'électronique se sent frustré. Le progrès de la médecine implique aussi un autre frein. Le souci de ne pas nuire limite certaines applications et ceci d'autant plus qu'elles entrent en concurrence avec d'autres techniques qui ont déjà une certaine efficacité.

Ces aspects ne sont pas absolument particuliers à la médecine et à la biologie. L'électronique rencontre les mêmes dans son invasion de toutes les activités et même de la vie courante. Ce qui est particulier, c'est que le médecin, préparé par une très longue formation qui comporte déjà des aspects très divers, voit encore s'élargir l'éventail de la culture scientifique et technique. Il est bien obligé de considérer comme étrangères toutes ces nouveautés qui envahissent la médecine et qu'il ne peut pas assimiler.

Dans la décennie précédente, les problèmes de médecine et de biologie ont retenu suffisamment l'attention de la SFER et de *l'Onde Electrique* pour fournir une dizaine d'articles. Dès 1960, la SFER avait une section médicale animée par M. Polonsky. Le dialogue entre électroniciens et biologistes s'est établi ensuite au niveau le plus élevé : M. Fessard, neurophysiologiste éminent, professeur au Collège de France, membre de l'Académie des Sciences présidait la SFER en 1968 alors que M. Corabœuf qui a introduit la microélectrophysiologie dans l'étude du cœur, présidait la 12e Section. La SFER a participé au premier congrès d'électronique médicale à Tours en 1967 et à celui de Nancy en 1969 et *l'Onde Electrique* publiait en 1970 un numéro spécial sur l'Electronique médicale et biologique.

2.2. L'impact de l'électronique sur la médecine

Les uns admettent sans examen que l'introduction d'appareils électroniques en médecine est un résultat considérable.

D'autres, soucieux de distinguer l'avantage réel de l'optimisme conformiste, se demandent :

— Quels sont les dispositifs électroniques utiles en médecine ?

— Quelles sont, parmi les techniques utiles, celles qui peuvent être intégrées en médecine ?

L'efficacité médicale d'une technique doit s'apprécier sur la mortalité ou sur la morbidité. Bien que d'une évaluation plus difficile, l'allégement de la souffrance ou de l'inquiétude peut aussi être pris en compte.

En dehors de ces objectifs médicaux, l'électronique peut encore diminuer la tâche de l'infirmière, celle du médecin, augmenter le confort du malade, faciliter la gestion, réduire les dépenses, etc. Bien que ces objectifs ne soient pas négligeables, bien qu'ils puissent indirectement servir la médecine, ils ne peuvent être portés au compte de l'efficacité médicale. Il n'est pas de bon augure d'afficher des buts sublimes et de ne contrôler leurs approches que par les critères les plus indirects.

Dans l'augmentation de la durée de vie, dans la diminution de la morbidité et de l'invalidité, il est difficile de faire la part de l'évolution des conditions de vie, du progrès des connaissances médicales et de l'application de certaines découvertes. Ce n'est pas toujours impossible, il serait facile de réunir des chiffres démontrant l'intérêt des traitements antibiotiques, par exemple. Personne n'hésitera, à juste titre, même en l'absence de chiffres, à reconnaître le grand rôle joué par la radiologie dans la diminution de la morbidité par tuberculose pulmonaire ou de la radiothérapie dans la survie des cancéreux. Pour guider la planification, l'équipement, la recherche, il faut utiliser les meilleurs critères.

Pour les méthodes d'exploration classiques, les critères d'efficacité accessibles ne sont, le plus souvent, qu'indirects et ne s'appuient pas sur des statistiques. Cette carence est en général définitive, car dès que la conviction du médecin est acquise, le malade n'étant pas un cobaye, il n'y a pas de place pour des jeux statistiques. Aucun médecin n'accepterait de se passer de la radiologie ou de l'électrocardiographie « pour voir ». A défaut de conviction quand il n'y a pas de risque et peu d'inconvénients, la présomption d'efficacité équivaut à la conviction.

Pour certaines méthodes thérapeutiques, la conviction d'efficacité est facile à obtenir. La fibrillation ventriculaire est fatale, il suffit de réussir quelques défibrillations. Pour d'autres, l'argument statistique est nécessaire, c'est ainsi que l'opportunité de la défibrillation auriculaire se juge sur la durée de la survie, la fréquence des accidents, etc. Le risque thérapeutique augmente la complexité du problème. Suivant une éthique raisonnable, bien qu'elle soit de moins en moins accréditée, on n'expérimente pas sur l'homme. Les données de l'expérimentation sur l'animal, la cohérence des propositions peut faire proposer une tentative diagnostique ou thérapeutique originale chez un sujet, si possible, réellement averti et consentant. Ceci ne peut être entrepris que s'il y a un bilan positif estimé des risques et des avantages. Le bilan *a posteriori* de telles tentatives doit être minutieusement tenu pour guider les décisions ultérieures avec l'appareil statistique nécessaire. Comme il y a lieu de respecter les contraintes médicales, il est exceptionnel qu'on soit autorisé à utiliser des méthodes radicales telles que « randomisation » des sujets, jugement en « double aveugle ».

L'électronique, l'électricité, la radiologie, les radioéléments ont certainement à leur actif une efficacité médicale réelle. Dans certains cas, cette affirmation peut être appuyée sur des chiffres, dans d'autres, les chiffres font défaut mais la conviction n'est ni moins rigoureuse, ni moins justifiée. Il ne faut pas en conclure que tous les appareils qu'on propose, du plus petit « gadget » au plus gros système, contribuent

à nous défendre de la maladie et de la mort. Au contraire, une telle généralisation, surtout quand elle n'est qu'implicite, doit faire redouter l'invasion de techniques inutiles, encombrantes, coûteuses, voire dangereuses, sous prétexte d'électronique ou d'informatique médicale.

Certains discutent aussi des effets « sécurisants » ou « anxiogènes » des appareils et du « monitoring », en particulier. C'est donner trop de place aux enveloppes et aux cadrans. Le problème peut d'ailleurs être ramené sans inconvénient à celui de l'aspect extérieur qui est plus simple.

Pas plus qu'il ne faut généraliser et juger en bloc l'électronique, il ne faut pas condamner ou accorder un non-lieu à la technique ou à l'appareil et ne pas mettre en cause les circonstances d'utilisation. La même technique est efficace dans certaines mains, dangereuse dans d'autres. La compétence, l'expérience des utilisateurs est, bien sûr, en cause. En général, le risque est aggravé en premier lieu par un optimisme qui admet *a priori* la supériorité de l'appareil, lui attribue un pouvoir magique, y trouve une solution de facilité, rejette pour la nouveauté les méthodes éprouvées et renonce, pour le décor, au sens critique. A l'opposé les utilisateurs prudents, voire scrupuleux, améliorent leurs résultats parce que, ne se privant d'aucun contrôle, ils entourent l'appareil et le malade de plus d'attention et de soins meilleurs. Les grands systèmes qui peuvent être difficilement intégrés par des responsables font courir un risque proportionnel à leurs dimensions. La même technique ne convient pas partout et, avant toute autre chose, il faut distinguer la technique nouvelle qui doit être proposée à des équipes averties, suffisamment informées, de la technique éprouvée qui doit être diffusée.

Sont regrettables des généralisations trop hâtives, les diffusions prématurées, les optimismes sans raison, au service d'intérêts ou d'ambitions personnelles, mais chaque fois qu'un constructeur fournit des appareils fiables à des équipes averties, chaque fois que les médecins abordent une technique nouvelle sans renoncer à l'acquis de la médecine, chaque fois que les tentatives d'exploration ou de thérapeutique donnent lieu à des bilans objectifs, il en résulte un progrès médical.

2.3. Impact de la médecine sur l'électronique

Ici, également, il est utile d'insister sur quelques notions, à vrai dire, assez peu connues.

La réalisation d'appareils ou d'instruments électroniques pour la médecine pose à l'industrie un problème tout à fait spécifique. Contrairement aux autres branches de l'électronique, où les problèmes sont presque toujours énonçables et définis, l'électronique médicale doit prendre en considération des objectifs de nature essentiellement médicale, donc imparfaitement définis dans presque tous les cas, flous et sujets à de nombreuses variations liées à l'individualité des différents praticiens de la même spécialité.

Les répercussions de cette situation sur l'industrie sont importantes. Par nature, en effet, l'électronique est une activité intrinsèquement onéreuse par la quantité de matière grise qu'elle consomme et les composants « raffinés » qu'elle met en œuvre. Un seul moyen pour réduire ce prix : des *programmes* de fabrication *répétitifs et automatisables :*

— *Programmes,* pour que le travail puisse être planifié et éviter les temps perdus qui sont générateurs de dépenses inutiles :

— *Répétitifs* pour profiter de l'effet de série qui réduit l'impact des études sur le prix de revient du produit.

— *Automatisables* pour fabriquer, dans des conditions économiques valables, en supprimant, dans la mesure du possible, la main-d'œuvre humaine dont le prix augmente avec le temps, par une main-d'œuvre « machine » dont le prix diminue avec le temps.

Malheureusement, le caractère médical du matériel concerné exclut ou atténue ces possibilités :

— programmes difficiles à établir parce que la dispersion et la diversité des centres médicaux rendent difficile une planification au niveau national, sauf cas très particuliers ;

— pas de séries importantes, les équipements d'électronique médicaux étant loin d'être universaux, mais n'intéressant, en définitive, qu'une fraction des malades, c'est-à-dire une minorité de la population ;

— automatisation possible seulement au niveau des sous-ensembles ou composants, en raison de l'individualité imposée à chaque fourniture pour répondre de façon convenable, à l'individualité médicale.

Dès lors, on comprend que l'industrie de l'électronique médicale représente un métier « à part » dans l'électronique. La règle du jeu favorise finalement les sociétés qui se caractérisent par une spécialisation de leur activité sur laquelle l'industriel concentre tous ses moyens d'études et de développement, ainsi que par un effort exceptionnel au niveau de la gestion pour réussir des fabrications assez économiques, malgré l'absence de séries importantes.

Ainsi la médecine n'avait pas tort d'espérer un miracle de l'industrie électronique, mais elle constate que si l'effort technique est assez remarquable, l'effort de gestion est, lui aussi, digne de remarque.

3. Recherche et diffusion des connaissances en électronique médicale et biologique

Nous n'avons pas trouvé le moyen de recenser utilement les établissements, instituts, organismes publics ou privés où sont conduites des recherches dans ce domaine ni même les rubriques où ils se classeraient.

La diffusion des connaissances acquises est un peu plus facile à suivre avec les associations scientifiques, les instituts, les enseignements, les publications, les réunions et congrès.

3.1. Les associations s'occupant d'électronique médicale et biologique

L'ANFEMB [1], Association Nationale Française d'Electronique Médicale et Biologique, a une origine médicale. Elle tient une réunion tous les deux mois, participe à diverses activités, s'exprime dans une revue « Electronique Médicale » et collabore à un enseignement au Centre hospitalier et universitaire de la Pitié-Salpêtrière (Pr Gougerot).

La SFER [2] organise ou participe à des réunions dans le cadre de sa 12e Section. Par ailleurs de nombreuses questions de biologie ou physiologie sont abordées dans d'autres sections. La vision des couleurs est du domaine de la télévision, la physiologie de l'audition s'intègre à l'électro-acoustique.

L'AFCET [3], Association Française de Cybernétique Economique et Technique, s'intéresse à l'électronique et à l'informatique médicale dans plusieurs sections.

Ces trois associations collaborent le plus souvent. Leur public est différent mais il s'intéresse surtout à l'élaboration de techniques, à la construction de dispositifs. On doit regretter la difficulté d'ouvrir à cette collaboration les associations médicales qui introduiraient dans le débat le point de vue des utilisateurs.

Il existe d'autres groupements : les sections françaises d'associations étrangères, des mouvements éphémères, des commissions ayant des objectifs précis et limités. Ceux dont l'activité en électronique médicale est la plus importante sont des associations médicales spécialisées : physique médicale, radiologie, médecine nucléaire, encéphalographie, anesthésie, cardiologie, etc. Beaucoup de problèmes sont présentés dans ce cadre, celui des utilisateurs et leur activité est, en général, ignorée des constructeurs. Les spécialistes de l'électronique médicale ne retiennent que les nouveautés qui n'ont pas encore trouvé d'emploi ou celles dont les techniques sont hésitantes. En dehors des applications médicales, les problèmes de biologie appliquée ne se traitent pas, en général, en biologie.

Que cet état de fait soit une spécialisation utile ou un cloisonnement regrettable, il ne facilite pas le passage d'une nouvelle technique vers les applications, ni la présentation des problèmes aux techniciens. Dans ce sens, on doit regretter que les problèmes médicaux soient très déformés. On admet, en général, que le rapprochement nécessite un langage commun. Le français pourrait en tenir lieu à condition de le dépouiller des jargons techniques. Si ces derniers simplifient la communication entre initiés, hors de ce cercle ils font illusion sur la compréhension et l'authenticité.

3.2. Les instituts

Les Universités, les Grandes Ecoles, les organismes officiels de recherche : CNRS [4], INSERM [5], des organismes de coordination tels que DGRST [6], DRME [7], des organismes d'enseignement privé, d'aide à la recherche médicale jouent un rôle qui est difficile à préciser.

Certains instituts ou écoles s'orientent plus vers l'électronique médicale ou lui consacrent un secteur d'activité : l'ENSEEIHT [8] à Toulouse, l'ESERG [9] à Grenoble, l'IGMB [10] à Nancy, l'INSA [11] à Lyon, etc. D'autres instituts ont un secteur médical dans le cadre de leur spécialité : l'IRIA [12] pour l'informatique, de même l'IBP [13], l'ISUP [14] pour la statistique.

Un institut international, l'IIMEBE [15] a son siège à Paris.

Ces sigles ne résument pas l'effort important tant dans les cadres traditionnels que dans des cadres nouveaux, tant dans les organismes généraux que spécialisés, tant à Paris qu'en province.

3.3. L'enseignement de l'électronique médicale

Il doit s'adresser à des ingénieurs et à des techniciens d'une part, à des médecins et à des auxiliaires médicaux d'autre part.

D'ici peu toutes les écoles qui enseignent l'électronique auront à leur programme au moins une initiation à l'électronique médicale. Si cet enseignement est cantonné à l'exposé de quelques techniques actuelles, il ne se heurte à aucune difficulté. Par contre, l'initiation à la mesure en biologie, aux contraintes particulières de la médecine, à la signification des signaux biologiques est d'une très grande difficulté. On peut incriminer le cloisonnement des enseignements et, dans le cadre de la « pluridisciplinarité », combattre les cloisons administratives. Ces dernières se laissent facilement abattre ou contourner ; il n'en est pas de même d'une longue formation scolaire qui aboutit à une culture spécialisée. La culture traditionnelle du médecin et celle de l'ingé-

---

(1) ANFEMB : Association Nationale Française d'Electronique Médicale et Biologique, 12, rue J.-Bingen, Paris-XVIe.

(2) SFER : Société Française des Electroniciens et des Radioélectriciens, 10, avenue P.-Larousse, 92-Malakoff.

(3) AFCET : Association Française de Cybernétique Economique et Technique. Centre Dauphine. Place Ml de Lattre de Tassigny, Paris-XVIe.

(4) CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, 13, quai Anatole-France, Paris-VIIe.

(5) INSERM : Institut National de Santé et de Recherche Médicale, 3, rue Louis-Bonnat, Paris-XVIe.

(6) DGRST : Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique, 33, rue Saint-Dominique, Paris-VIIe.

(7) DRME : Direction des Recherches et des Moyens d'Essais. 5, *bis* avenue de la Porte-de-Sèvres, Paris-XVe.

(8) ENSEEIHT : Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique d'Electronique d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse, 2, rue Charles-Camichel, 31-Toulouse.

(9) ENERG : 40, avenue Félix-Viallet, 38-Grenoble.

(10) IGMB : Institut de Génie Médical et Biologique, BP 31, 54-Nancy.

(11) INSA : 20, avenue Albert-Einstein, 69-Villeurbanne.

(12) IRIA : Institut de Recherche d'Informatique et d'Automatique, Domaine de Voluceau, 78-Rocquencourt.

(13) IBP : Institut Blaise-Pascal, 23, rue du Maroc, Paris-XIXe.

(14) ISUP : Institut de Statistique de l'Université de Paris, 9, quai Saint-Bernard, Paris-Ve.

(15) IIEMEBE : International Institute for Medical Electronics and Biological Engineering, 45, bd de l'Hôpital, Paris-XIIIe.

nieur s'opposent. Plus de finesse d'un côté, plus de géométrie de l'autre. La description nuancée des uns est littérature pour les autres ; l'expression condensée des uns est une mécanisation simpliste pour les autres. L'ingénieur est habitué à considérer toutes les alternatives, qui ne sont jamais nombreuses, à classer en grandes catégories. Pour le médecin, l'analyse la plus fine du malade fait apparaître les différences qui le distinguent des cas les plus proches. En dernière analyse, toutes les machines sont pareilles pour l'ingénieur et, pour le médecin, tous les vivants ont une personnalité propre. Cette opposition paradoxale n'est que superficielle ; une bonne culture générale, une rigueur cartésienne de raisonnement, un langage nuancé et permanent au-delà des modes, comme le français classique, devraient faciliter les échanges.

A un certain niveau, des stages seraient souhaitables s'il existait des services pour accueillir des stagiaires. Le problème n'est pas en effet de mettre l'ingénieur en contact avec le malade ou le drame, mais en contact avec le problème technique de l'exploration ou de la thérapeutique.

Dans les hôpitaux, on souhaite beaucoup la présence de techniciens. On n'est guère exigeant sur leurs titres, mais on leur suppose des compétences et des qualités exceptionnelles. Le technicien en électronique, dans un hôpital comme dans un laboratoire de biologie, est, le plus souvent, isolé. Les problèmes qu'on lui pose ne sont pas nécessairement de son niveau, certains sont même insolubles. Il doit être capable d'acquérir seul une expérience professionnelle et de s'adapter à un milieu qui, pour lui, est tout à fait nouveau. Il devra exposer ses difficultés, proposer ses solutions à des gens pressés et qui ne sont pas très au fait des techniques.

L'entrée de l'électronique dans l'enseignement médical n'est pas aussi révolutionnaire. Elle est moins radicale et plus ancienne. Il existe un enseignement traditionnel de la « physique médicale », il traite depuis longtemps des problèmes de thérapeutique par les agents physiques et des méthodes d'exploration. La radiologie s'est très bien intégrée dans cette tradition, ainsi que la médecine nucléaire. Des enseignements d'électronique et d'informatique médicales dérivent déjà de la « physique médicale ». Il n'y a rien à créer, il suffit de tenir à jour et peut-être de modifier quelques orientations. C'est un gros avantage pour un enseignement que de disposer d'une tradition, il ne faut pas la renier. La « physique médicale » n'a jamais eu auprès des étudiants en médecine un succès considérable et ceci malgré des efforts judicieux et importants. Cette discipline est abordée au début des études médicales, dans un ensemble de « sciences fondamentales » par des étudiants pressés d'accéder à la médecine et qui ne disposent pas des éléments qui leur permettraient de juger de l'intérêt de ce qui est enseigné. Par ailleurs, la surcharge des programmes tant en quantité qu'en variété ne favorise pas les efforts d'intelligence. Pour le bagage de l'étudiant qui se destine à l'exercice de la médecine dans les conditions habituelles, le problème est d'adapter sans surcharge. Des connaissances incomplètes seraient moins graves qu'un fatras de notions retenues mais non assimilées pouvant servir de décor mais non d'outil.

Un enseignement spécialisé existe dans le cadre aux mille facettes de la maîtrise de biologie humaine. Dans certaines facultés, à Paris notamment, cet enseignement existait avant que le cadre en soit défini.

Les facultés des sciences ont eu, pendant longtemps, un rôle prédominant dans la mise au point et la diffusion des techniques. Actuellement encore, certains laboratoires de biologie n'excluent pas systématiquement les applications pratiques de leurs préoccupations. Par ailleurs, des laboratoires d'électronique, de physique, de chimie, de statistique, d'informatique s'intéressent aux applications médicales. Dans le domaine de la recherche, leur apport est d'autant plus riche qu'il est plus récent ; dans le domaine de l'enseignement il est difficile de l'apprécier.

Comme tout enseignement nouveau, celui de l'électronique médicale et biologique rencontre des difficultés. Les unes viennent de la dualité de son public, les autres, de sa nouveauté. Dans ce cas, on met souvent en avant les problèmes matériels : organisation, locaux, enseignants, crédits, etc. Il ne faut pas ignorer que l'expérience du corps enseignant, l'existence de documents, la tradition pédagogique ont une importance considérable et que ces éléments ne s'acquièrent qu'avec le temps.

3.4. Les publications françaises d'électronique médicale

Il existe une revue spécialisée « Electronique médicale » et une revue d' « Informatique médicale ». On peut leur adjoindre certains bulletins dont la parution n'est pas régulière : celui du CNRS, celui de L'IGMB par exemple.

Les revues de médecine et d'électronique non spécialisées fournissent, en fait, une information plus importante. Les unes couvrent des domaines proches : biophysique, radiologie, etc., d'autres s'intéressent aux techniques utilisées dans leur spécialité médicale. Il y a quelques années, les articles de technique étaient exceptionnels dans les revues médicales ; ils étaient considérés comme marginaux, justifiés par des considérations cliniques. Actuellement ils sont à la mode. Pour l'électronique médicale c'est un signe d'intérêt et indirectement d'efficacité, mais cela entraîne une dispersion des documents techniques au détriment des électroniciens.

Des numéros spéciaux tentent de donner un panorama de l'électronique médicale. (*Procédés électroniques*, 1962 ; *Annales de l'anesthésiologie française*, 1964 ; *Bruit de fond*, 1964 ; *La Vie médicale française*, 1965 ; *Flux*, 1967 ; *Onde Electrique*, 1970).

Les comptes rendus des congrès sont une source plus abondante et plus condensée. On ne dispose malheureusement que des résumés du premier congrès français d'électronique médicale (publiés par *l'Electronique Médicale*) et d'une partie des communications du second (publiés dans le bulletin de l'IGBM). On dispose, par contre, des comptes rendus

des Journées d'Informatique Médicale (5 volumes depuis 1964 publiés par l'IRIA).

Les documents dont on peut disposer sont abondants, mais ils sont dispersés et, de ce fait, difficiles à consulter. Les articles originaux sont nombreux, si on considère que l'originalité consiste à relater un travail personnel sans référence aux travaux analogues, voire identiques. Il est très difficile de trouver des travaux de synthèse et de mise au point.

Le traité, la monographie sont des genres littéraires difficiles pour les disciplines en pleine expansion. On comprend qu'un auteur ou une équipe hésite avant d'entreprendre la rédaction d'un ouvrage qui a toutes les chances d'être périmé avant d'être terminé et pour lequel il est difficile de prévoir la formation scientifique des lecteurs.

3.5. Réunions et congrès

Le premier congrès français d'électronique médicale s'est tenu à Tours en 1967, le second à Nancy en 1969. Depuis 1964, il y a eu chaque année des journées d'informatique médicale à Toulouse, puis à Saint-Lary.

Depuis plus de dix ans, il y a, plus ou moins régulièrement, à Paris des réunions organisées par l'ANFEMB avec le concours de la SFER et de l'AFCET. A ces réunions, sans thème prévu à l'avance, on préfère des journées de travail, des tables rondes ou autres formules qui favorisent la discussion sur un thème limité.

Il faudrait tenir compte aussi de ce qui est organisé sous d'autres rubriques.

La situation actuelle n'est pas satisfaisante du fait de la dispersion, conséquence de la diversité du public. Des présentations de techniques qui intéresseraient des médecins ont, le plus souvent, un public d'électroniciens et des discussions qui intéresseraient les ingénieurs sont cantonnées en milieu médical. Plus regrettable encore est l'insuffisance de publication des communications et des comptes rendus des discussions.

4. Conclusion

L'électronique médicale n'est pas une véritable discipline scientifique qui aurait un objet propre et des méthodes originales. On ne doit pas non plus la réduire à la fourniture de quelques appareils. Au-delà des rapports de production-consommation, c'est un domaine de connaissances et d'activités disparates sur lequel convergent le vivant et le mécanique.

Les médecins et les ingénieurs diffèrent par les problèmes qu'ils se posent, par les techniques qu'ils utilisent. Les différences sont tellement importantes qu'elles se prolongent par une manière particulière de raisonner et de vivre. Leur rencontre risque d'être une confrontation de tempéraments et de caractères.

Certains pensent que la médecine est à l'heure du choix. La seule alternative qu'ils avancent comme inévitable est celle d'une transformation radicale abolissant *a priori* l'originalité des données et des problèmes médicaux. Cette tendance n'est pas le seul fait des ingénieurs, les journalistes et l'opinion publique y souscrivent volontiers et même des médecins gagnés par l'invasion des techniques et absorbés par des tâches qui aboutissent à une mécanisation sans laisser de loisir pour la réflexion.

La médecine a fait d'énormes progrès durant les dernières décennies. Il n'est pas nécessaire, pour reconnaître leur importance, d'exagérer ceux qui sont dus à l'électricité et à l'électronique, ni de leur attribuer la première place ou l'exclusive.

Mais si on considère les progrès que ces techniques ont permis de réaliser dans d'autres domaines, la comparaison agace.

Pour expliquer cette insuffisance, on ne peut faire appel aux boucs émissaires de toutes circonstances : traditionnalisme excessif, manque d'audace, manque de crédits, mauvaise organisation sociale, etc. Non spécifiques, ils ne peuvent expliquer que des déficiences générales d'une civilisation dont ils n'ont pas empêché d'ailleurs certains avantages. L'épine qui nous énerve est localisée.

Pour que l'effort soit mieux adapté, il faut que les ingénieurs comprennent mieux les problèmes et les contraintes médicales. Il faut que les médecins comprennent mieux les possibilités des techniques, leurs limites et les contraintes industrielles. Il faut que tous élargissent non seulement leur information, mais aussi leurs communications.

Jusqu'à ce jour, les applications se sont développées au hasard, souvent avant que les problèmes soient clairement définis. Actuellement, les possibilités sont de plus en plus nombreuses, et le hasard ne peut guider un choix. L'élégance des techniques, l'étonnement qu'elles provoquent, ne doivent plus laisser dans l'ombre la simplicité et la rigueur des méthodes pertinentes.

M. PONTE

Directeur de l'Association Nationale pour la Valorisation de la Recherche
Membre de l'Académie des Sciences
Ancien Président de la SFER

Prospective

Après les articles précédents qui ont traité les aspects les plus récents des techniques de l'Electronique et de leur avenir, il est difficile d'échapper, à propos de prospective, aux écueils des redites ou de la technique-fiction. Je tâcherai de les éviter, en redoutant cependant ce que pourront penser les lecteurs du numéro du soixante-quinzième anniversaire de la revue : puissent-ils ne pas me prendre, comme d'ailleurs les lecteurs actuels, pour un rêveur ou, au contraire, comme manquant d'imagination ! Et, n'étant pas prophète, je ne puis tenir compte des suites de la recherche : qui aurait pu prévoir, il y a seulement vingt-cinq ans, l'apport de la physique du solide aux développements de l'Electronique ?

Je me limiterai à des problèmes de fond, en ne me laissant pas entraîner vers les développements publics de l'électronique qui se généraliseront sans cesse depuis la cuisinière haute fréquence jusqu'au journal télévisé à domicile en passant par les freins de voitures, les bistouris ou les montres. Qu'on se garde toutefois de baptiser « électronique » un appareil dès qu'il est muni d'un moteur ou d'un relais.

Il ne sera pas non plus question d'aborder les domaines strictement militaires en montrant les responsabilités de l'électronique dans l'animation de spectacles apocalyptiques ou de la protection contre leur déclenchement, puisque nous ne sommes pas dans le journalisme à sensation.

1. Création et exploitation de systèmes en conditions physiques inhabituelles ; exploitation des ressources naturelles, espace

Sur le plan général, on peut dire que l'électronique aidera les hommes à exploiter des domaines soumis à des conditions très différentes de celles auxquelles les sens humains sont adaptés : la détermination des facteurs de fonctionnement et leur commande dans un but fixé se feront par des capteurs adaptés, le procédé s'exécutant automatiquement ou par décisions humaines. De multiples exemples peuvent se prévoir lorsqu'il s'agit de températures élevées ou très basses, de pressions inhabituelles en milieu gazeux ou liquide. L'une des applications récentes les plus étonnantes, récemment annoncée par une association entre une entreprise belge et une allemande, est celle du traitement des ferrailles à la température de l'azote liquide : le fer devient tellement cassant qu'un broyage le réduit en morceaux facilement séparables des autres substances du mélange, au moyen d'un champ magnétique : de tels procédés ne peuvent être économiquement conduits que par un contrôle électronique des appareils et du procédé.

Il s'agit là d'une opération élémentaire, mais l'électronique permettra d'assurer l'exploitation d'ensembles complets dans des environnements, artificiels ou naturels, comme le fond des océans, les profondeurs de la terre, les volcans. On peut donc prévoir qu'elle permettra une exploitation généralisée des ressources naturelles « in situ », au lieu de recourir à des extractions préalables des minerais ou combustibles, ce qui conduit, dans ce dernier cas, à d'énormes gaspillages. Ce sera en effet une condition primordiale d'élévation du niveau économique mondial moyen que de tout mettre en œuvre pour économiser les ressources naturelles, alors que la population du globe croît dans des proportions historiquement inconnues : selon les prévisions actuelles, elle doublera d'ici l'an 2000 et consommera environ dix fois plus d'énergie que maintenant, bonne raison pour gérer les ressources énergétiques naturelles en bons pères de famille. Des problèmes analogues se poseront pour la nutrition, les matières premières, auxquels s'ajouteront ceux que pose la pollution, dont les plus graves sont ceux dont on parle le moins : l'élévation des quantités de chaleur dispersées dans

l'atmosphère et l'élévation continue du taux de gaz carbonique de l'air, deux facteurs dont les conséquences sont encore imprévisibles. Il sera impossible de trouver des solutions par les voies classiques et, seuls, les moyens électroniques pourront apporter les réponses, par exemple grâce à des usines entièrement souterraines et fixation automatique du gaz carbonique.

L'exploration de l'espace apporte un autre exemple de ce qui sera demandé à l'électronique et aux télécommunications. Il faut, en effet, y prévoir le développement des systèmes automatiques commandés de la terre par des opérateurs humains. L'exploration directe par astronautes se limite à la proche banlieue terrestre, celle des plateformes satellisées ou, à la rigueur, de la lune, pour la seule raison qu'aucun être humain ne pourrait supporter la durée du voyage aller-retour le plus court, celui de Terre-Vénus ou Terre-Mars. Mais, pour que le système automatisé commandé puisse fonctionner correctement, c'est-à-dire par télévision en temps réel, ou au moins une transmission de données suffisante, il faudra augmenter considérablement l'énergie disponible à bord de la sonde spatiale. L'énergie nucléaire apportera des solutions qui seront probablement les seules possibles durant le trajet et des résultats s'annoncent. Mais on peut concevoir qu'à destination, la sonde pourra produire son énergie à partir d'éléments recueillis sur l'astre lui-même : ce peut être envisagé dans le cas d'une planète plongée dans une atmosphère, en y provoquant une réaction exothermique par voie catalytique à partir des gaz présents. Ce n'est certes pas pour demain, car, si des gaz cohabitent normalement dans un mélange, c'est qu'ils n'ont pas d'affinité chimique dans les conditions naturelles où ils se trouvent. Mais l'exemple de l'azote et de l'oxygène montre qu'on peut provoquer des réactions entre eux. Il est donc probable que les systèmes d'exploration dirigés de la terre utiliseront des sources énergétiques de ce type. Il restera évidemment à construire des matériels capables de supporter les conditions auxquelles ils seront soumis et les Soviétiques ont ouvert la voie avec leurs essais sur Vénus : les « retombées » de ces études sur l'industrie des composants et des matériaux seront importantes et utiles pour les exploitations terrestres déjà évoquées.

Tout ceci confirme un caractère essentiel de l'électronique future, celui de permettre et, au besoin, de créer l'exploitation de mondes qui échappent à la seule action des sens humains. Cet univers « extra-humain » sera probablement l'une des créations les plus étonnantes de l'électronique future.

2. Informatique et automatisme

On ne prend pas un grand risque en prévoyant une extension rapide des applications de l'informatique, mais quelques remarques peuvent être faites sur l'évolution des conceptions des systèmes et sur certains de leurs domaines d'application.

En premier lieu, et c'est essentiel, le software — ce mot d'argot américain a bien des chances de persister malgré les propositions de termes français aussi laids — affirmera sa prééminence. Les énormes unités de calcul bonnes à tout ressembleront pour nos descendants à la Panhard ou à la Voisin de l'époque 1914-1925 : les calculateurs seront constitués d'éléments modulaires compatibles assemblés en fonction d'un software particulier et limités à celui-ci, avec les périphériques strictement nécessaires. Sur le plan technologique, il est probable que, dans dix ou vingt ans, les mémoires seront à base de grosses molécules si leur durée peut être amenée à un niveau suffisant, l'unité de calcul étant miniaturisée à l'extrême : ainsi, l'emploi des méthodes de l'informatique se « popularisera » pour atteindre les organisations les plus modestes et même les particuliers.

Quelques « grosses unités », avec leur entourage périphérique complexe resteront soit pour une affectation à un domaine important soit pour être employées en temps partagé. On peut citer à cet égard la documentation. Les publications de toute nature sont devenues tellement nombreuses et variées que personne ne peut les connaître dans leur ensemble, même pas dans leurs sommaires. Il est par ailleurs impensable d'avoir une énorme banque de données, bonne à tout et en n'importe quelle langue : la façon d'interroger ce monstre ne pourra probablement jamais être mise au point. Mais on peut prévoir des centres de documentation automatique par grande spécialité avec, en deuxième échelon, un centre de synthèse qui pourra répondre à partir des éléments fournis par les premiers en les interprétant sur un plan plus général. C'est de nouveau la classification « horizontale » ou « verticale » : par exemple, le centre de documentation Chimie peut donner l'état de la technique des aciers spéciaux à un moment donné et le centre de synthèse économique les répercussions des innovations correspondantes sur les industries en cause, sur l'économie du pays et les conséquences sociales éventuelles. Dans ce dernier cas, le centre de synthèse est consulté en temps partagé.

Dans cet ordre d'idées, se trouve la documentation relative aux brevets dont la situation devient inextricable, avec une production mondiale actuelle de près de 400 000 brevets dont l'originalité est difficile à déceler.

Tous ces centres de documentation automatique vaudront par la manière suivant laquelle ils pourront adapter leur réponse au profil d'intérêt du demandeur : c'est un exemple typique de l'importance primordiale du software et il n'est pas sûr que des solutions puissent être trouvées avant longtemps.

Un autre grand domaine d'application de l'information traitée par l'électronique sera celui de la santé. Chacun aura sa fiche, établie dès le plus jeune âge collectée dans un centre de calcul et constamment mise à jour, par exemple sous le numéro de la Sécurité Sociale, affecté à la naissance. Ceci ne signifie nullement que les médecins disparaîtront et que les soins seront automatisés, mais le docteur ou l'hôpital, munis du calculateur individuel mentionné plus haut, pourront interroger le calculateur central et éviter ainsi des erreurs ou pertes de temps. La Sécurité Sociale elle-même y trouvera son intérêt, car elle pourra être informée sur ce que coûte chacun ; de même, ce système central permettra

d'obtenir une information statistique sur la valeur des médicaments, ce qui sera probablement décevant. Il est certain que la mise à jour permanente de ces fiches de santé individuelles posera des problèmes devant la tradition du secret professionnel médical, mais c'est un des nombreux cas d'incompatibilité entre une civilisation technologique avancée et la liberté individuelle.

L'informatique accentuera son emprise dans un domaine qu'elle a déjà effleuré, celui de la lutte contre la criminalité et on sait que c'est une préoccupation actuelle en tous pays. L'établissement des bulletins de recherche sera entièrement confié à des calculatrices, constamment mises à jour, avec suppression des fichiers manuels. Ce centre rassemblera les renseignements venus de tous services depuis les données criminelles jusqu'à celles de la circulation routière, avec enregistrement et reconnaissance des empreintes digitales par holographie. La collecte de toutes ces données individuelles, jointe aux conditions de l'environnement juridique, social, psychologique, psychiatrique, permettra, non seulement de préparer les jugements, mais aussi, et surtout, de tenter de prévoir les délits et leurs causes de même que de leur trouver des remèdes.

L'informatique sera une aide précieuse dans les problèmes économiques lancinants de l'heure, tels que ceux du domaine agricole, à la condition qu'elle soit admise. Il est certain qu'une bonne part des difficultés actuelles vient de ce que les agriculteurs moyens ne savent pas faire leurs comptes, charges financières comprises et qu'ils ne disposent pas de prévisions de marchés. Les paysans devront pouvoir s'affilier à une organisation centrale, par région, qui leur fournira leurs prévisions et résultats d'exploitation à partir d'éléments simples, les conseillers agricoles les aidant à bien formuler les questions et donner les éléments utiles. Sur le plan des prévisions de marchés, celles-ci ne pourront se faire qu'en liaison avec celles de la météorologie dont les aléas diminueront, grâce aux satellites spécialisés dont les informations seront traitées automatiquement. L'accumulation de ces dernières données et leur rapprochement avec les quantités récoltées en produits divers devraient permettre de dégager des lois de prévision qui éviteraient les incohérences actuelles. On devrait ainsi arriver à prédire pourquoi, en 1970, en tous pays d'Europe, la récolte de vin a été surabondante. Même la RFA a surpassé ses records avec un rendement de 134 hl en moyenne à l'hectare.

Il est à peine besoin de mentionner que le calcul électronique verra ses applications se développer dans les domaines scientifiques, où il permet les calculs les plus complexes et la recherche de lois statistiques, ce qui en fait un auxiliaire essentiel des sciences humaines, lesquelles se développeront grâce à lui.

En automatisme, on pourrait se laisser aller aux débordements de l'imagination, surtout dans l'optique des minicalculateurs déjà évoquée et en remarquant que le calcul analogique devrait reprendre une certaine importance. On pense aux industries les plus diverses, spécialement celles qui ne pourront assurer la qualité et la fiabilité de leurs produits que par des fabrications automatisées, et elles seront de plus en plus nombreuses : il est possible d'évoquer l'automatisation des exploitations tertiaires dont le tri postal est un cas important, la navigation automatisée par satellites spécialisés, etc.

Une remarque paraît digne d'être soulignée, relative aux pays en voie de développement. Ils doivent chercher à adopter les méthodes d'industrialisation les plus modernes, et par conséquent, l'automatisation, sans se laisser prendre au mirage de la main-d'œuvre bon marché : c'est à ce prix qu'ils éviteront le risque d'être toujours en retard de plusieurs années en gravissant le chemin parcouru par les nations économiquement évoluées. La France devrait aussi appliquer ce principe au moment où son bilan positif à l'exportation est dû à ses produits agricoles, ses matières premières et ses produits bruts, ce qui n'est pas de bon augure pour l'emploi de sa population active.

3. Les télécommunications

Les télécommunications par satellites ne pourront que se développer : faut-il rappeler que, même aux Etats-Unis, les prévisions globales des besoins ont été largement sous-estimées : 4 % d'augmentation en 1970 contre 16 % dans la réalité et certains prédisent que le trafic en télécommunications sera sextuplé dans les cinq ans à venir. Il faut donc utiliser toutes les possibiltés de la technique, mais, devant cette demande, les télécommunications vont offrir un exemple typique des inconvénients de la libre entreprise : la concurrence devra être soumise à des arbitrages dont la nécessité se fait déjà jour aux Etats-Unis où la situation devient déraisonnable. Depuis la création de la Comsat (Communications Satellite Corp.) en 1962, neuf projets de satellites synchrones « domestiques » ont vu le jour : or, sur l'arc d'équateur qui permet la liaison globale de l'Alaska à Porto-Rico, soit 40° entre 100° et 140° de longitude Ouest, il n'est techniquement possible que de placer huit satellites, les écarts entre eux devant être de cinq degrés pour éviter les interférences, alors que le Canada réclame deux places.

La compétition est donc chaude et s'exerce entre compagnies puissantes : Comsat, ATT-Comsat, Western Union (la première à avoir déposé un projet complet de système pour tous usages), RCA et ses filiales, Microwave Communications, Hugues-Aircraft, Western Telecommunications (actuellement télévision), Fairchild-Hiller qui a été la première à recevoir de la NASA des contrats pour les satellites de technologie avancée. Or les investissements pour un seul projet sont d'environ 250 millions de dollars pour un réseau complet : pour être rentable, celui-ci doit être assuré d'un revenu annuel de 40 à 50 millions de dollars, ce qui amène à prévoir une capacité de circuits téléphoniques allant jusqu'à 30 000 ou 40 000. La Federal Communications Commission (FCC) a donc devant elle un travail d'arbitrage peu commun, qui dure d'ailleurs depuis 1966. Quels seront les développements de la situation dans les années à venir ? Elles sont encore imprévisibles, si ce n'est qu'il faudra bien mettre des limites à la compétition libre si on veut éviter des situations analogues à celle des transports aériens, à une échelle encore plus grave.

Sur le plan international, la position économique est plus claire, Intelsat ayant jusqu'ici un monopole après des péripéties politiques qui ont atteint leur paroxysme en 1968, mais se sont atténuées en 1969 avec l'admission des pays de l'Est. On peut prévoir sans risques qu'avec le développement des populations du globe, en nombre et niveau de vie, le réseau Intelsat 4, avec ses satellites à 5 000 voies téléphoniques sera insuffisant. Le nombre de ses stations au sol, actuellement de 51 dans 30 nations, ne pourra qu'augmenter. Enfin, d'autres systèmes verront le jour, établis par l'Europe, l'URSS, le Brésil, le Japon et peut-être la Chine, l'URSS continuant l'exploitation de son réseau de satellites à défilement Molnya : ainsi, on pourrait prévoir qu'en 1985, soixante satellites de télécommunications synchrones seraient en service, avec des liaisons entre eux.

Mais d'autres facteurs vont jouer dont il faudra tenir compte sur les plans technique, économique et politique.

Les besoins militaires ont des caractères spécifiques, leurs exploitants réclamant pour eux des systèmes qui leur soient affectés, au moins pour une partie de leur trafic. Les autorités militaires américaines, après des essais sur 25 satellites « géo-stationnaires » en 1966-1967 et le lancement en février 1969 du satellite synchrone Taccomsat ont prévu l'emploi en 1972-1973 de plusieurs de ces satellites avec quelques milliers de voies téléphoniques, sans compter les systèmes type Mallard prévus pour assurer des communications directes entre toutes les forces armées des Etats-Unis, du Royaume-Uni, du Canada et de l'Australie.

En même temps, le centre de gravité de l'exploitation des réseaux de télécommunications va se déplacer du téléphone ou de la télévision vers les transmissions de données. On connaît actuellement les prévisions des militaires américains : ils utilisent maintenant 48 % de leurs moyens en téléphone ou similaire et 14 % en transmission de données : vers 1980, ce rapport sera 50/50. Cette tendance sera la même pour les besoins de l'exploitation générale. Or, la transmission de données exige une qualité de liaison supérieure : les diaphonies, bruits, parasites amènent à des erreurs inadmissibles à un niveau que les liaisons téléphoniques peuvent à la rigueur supporter. Ces perturbations apparaissent lorsque les équipements sont surchargés : il faudra donc proscrire la saturation des moyens et, par conséquent, en prévoir encore davantage.

Ainsi, un humoriste pourrait dire que, dans la décennie qui vient, il n'y aura pas assez de place dans l'Espace, au moins avec les systèmes à satellites synchrones : on vérifiera une fois encore ce que les spécialistes des télécommunications ont subi dans le domaine des fréquences : la Nature limite les ambitions techniques.

D'autres éléments vont les forcer à trouver d'autres solutions supplémentaires.

Les systèmes à satellites synchrones sont éminemment vulnérables devant les brouillages et les militaires sont les premiers à s'en soucier : le fonctionnement correct des stations spatiales peut être perturbé sans aller jusqu'à leur destruction, par des nuages ionisés ou des particules de dimensions déterminées dans ce but. Cet « environnement » peut être provoqué par une nation qui ne disposerait que de moyens de lancement modestes. Les exploitants civils se soucieront aussi de ne pas dépendre uniquement de systèmes qui risquent d'être assujettis à des conditions qu'ils ne maîtriseraient pas. Il faut aussi remarquer que si le développement des liaisons spatiales a pratiquement supprimé le rôle des centres de transit comme Londres ou Paris, il a donné une importance politique aux nations où sont installées les stations terrestres du réseau et certaines d'entre elles pourront être tentées d'en jouer sans scrupule.

Ces risques, s'ajoutant à certaines incertitudes techniques, notamment en ce qui concerne la durée des équipements, ont déjà amené la FCC à demander à l'ATT de souscrire à une sorte d'assurance suivant laquelle cette compagnie devra assurer, au moins partiellement, le trafic en cas de défaillance du système spatial.

Toutes ces considérations amènent à prévoir deux développements au moins qui viendront en appoint ou en parallèle.

Il est, en effet, probable que, dans peu d'années, nous assisterons à la mise sur orbite de plateformes terrestres qui évolueront à 300-1 000 km de notre planète : elles pourront être habitées et de grandes dimensions par assemblage sur place d'éléments (1). Initialement, elles seront, au moins officiellement, destinées à des observations astronomiques dégagées des inconvénients dus à l'atmosphère terrestre. Mais une vingtaine de ces plateformes, en vision mutuelle directe, formeraient un réseau de stations capable de relier des zones terrestres très étendues, des lignes à retard compensant les effets dus à la variation des longueurs des trajets d'un point à un autre. Les plateformes pourraient être alimentées en combustibles nécessaires à leur maintien en place ou à de légers déplacements. Elles pourraient recevoir et distribuer du courrier, venu de terre ou y allant, par engins guidés. Ces centres spatiaux de trafic et de tri, qui seront probablement habités, seront vraisemblablement mis en service.

Mais les risques dus aux stations terrestres, bien que diminués, persisteront et, en cas de conflits, la vie des plateformes restera précaire. Et, puisque les grands principes restent, il faudra encore constater que les liaisons les plus sûres dans tous les cas de figure sont assurés par des câbles et on verra certainement se développer les techniques modernes des câbles creux à transmissions optiques ; il est possible qu'on arrive à de bons résultats par l'emploi de gaz ou vapeurs assurant les gradients radiaux d'indice nécessaires.

L'aspect spatial du développement des communications n'est évidemment pas le seul, mais que dire ici de plus que les prévisions exposées dans les multiples travaux, conférences ou déclarations ministérielles à leur sujet, sans omettre les exposés de ce numéro de la revue ? Ce sont naturellement les progrès de la commutation électronique temporelle qui joueront le plus grand rôle et le Colloque Inter-

(1) Cet article a été écrit avant le lancement du Soyouz (NDLR).

national de mars-avril 1966 en reste la Bible. En tout cas, c'est là un domaine de choix, complet, du rôle de l'électronique dans les économies futures.

Qu'il suffise de mentionner sur le plan technique que les câbles creux affirmeront, là aussi, leur importance, en particulier pour les communications vidéotéléphoniques, et que les annuaires téléphoniques perdront leur aspect de gros dictionnaires, même si les mères de famille doivent le regretter pour surélever le siège de leur progéniture ou pour leurs emballages.

4. L'enseignement

Il est certain que les méthodes d'enseignement, à tous les niveaux,seront de plus en plus dépendantes des moyens de l'informatique électronique, seuls capables d'individualiser leur action. Cette nécessité s'impose dès l'école du premier degré devant le nombre croissant des élèves dits inadaptés, dyslexiques, dysgraphiques ou caractériels qui ne peuvent suivre des méthodes établies pour des moyennes. L'enseignement du second degré, qui détermine toute une vie, doit déjà détecter les dons de chacun et s'y adapter par influence personnalisée et non par classes de cinquante. Dans l'enseignement supérieur, les aptitudes et la préparation de chacun doivent être prises en considération afin de mettre l'accent sur une discipline particulière tout en ménageant les possibilités d'acquérir une culture générale, que ce soit en facultés, ou dans des écoles. Ensuite, à l'entrée dans la vie active, une formation complémentaire pourra être nécessaire pour assurer une adaptation rapide à la spécialisation choisie. Enfin, pour satisfaire à la nécessité de la formation continue, exigée par la rapidité de l'évolution des techniques, l'enseignement pour adultes, si délicat, devra être développé.

La complexité de ce programme, qui devra s'appliquer à des millions d'individus ne peut être surmontée que par des moyens électroniques. Les préventions contre eux viennent d'un mauvais départ : le défilé de programmes devant l'élève avec réponses par oui ou non n'a aucune valeur éducative. L'enfant, l'étudiant ou l'adulte doivent jouer un rôle actif en s'entretenant avec la machine dès l'enseignement du premier degré. Celle-ci joue en somme le rôle d'un professeur patient qui ne s'étonne de rien : l'élève garde une initiative personnelle et l'exercice de la répétition, essentiel pour les premières étapes de la formation. L'élève sera également, par une bonne préparation des données et programmes mis en mémoire, amené à effectuer sur la machine, en sciences expérimentales, des manipulations qui lui donneront le goût de l'expérience. De sa place, avec un tube en couleurs, pourront être conduites des réactions chimiques passionnantes... même explosives, et l'élève de terminale pourra lui-même procéder au lancement d'un satellite. L'exercice de ces possibilités devrait ramener aux études scientifiques la masse des étudiants qui s'en détournent, rebutés par des méthodes livresques qui les ennuient.

Dans l'enseignement supérieur, les méthodes prendront la forme de l'enseignement assisté : dans cette méthode, le profil de l'étudiant, avec ses goûts et ses connaissances de départ, détermine les questions posées à la machine qui tiendra compte des besoins de l'économie dans sa réponse, laquelle fournit à l'élève un programme de travail personnel « pluridisciplinaire » sur cours, livres, expériences à faire dont la liste sera donnée. Ce travail est suivi par des assistants et des professeurs. Les progrès sont évalués par la machine lorsque ceux-là l'estiment utile et on passe à une étape ultérieure déterminée suivant les connaissances assimilées. Le système d'enseignement assisté est particulièrement adaptable à la formation continue des adultes et il y a beaucoup de raisons pour qu'il prévaille dans dix ans. Les professeurs n'ont pas à s'en inquiéter, car leur rôle dans la détermination, la constitution des programmes et la surveillance des résultats sera fondamental ; en fait, ils seront ainsi déchargés de l'assujettissement des examens localisés dans le temps, l'orientation des étudiants se faisant de manière continue. Dégagés des travaux de routine attachés aux méthodes dites classiques, ils pourront davantage se consacrer à la recherche et aux chercheurs, ce qui, évidemment, n'est plus du domaine des machines, si ce n'est comme auxiliaires des travaux.

Il faut prévoir que l'industrie de l'électronique et de l'informatique consacrera vers 1980 une large part de son activité aux matériels destinés à l'enseignement.

5. Les transports

Il faut bien remarquer que les transports de personnes se sont développés, d'ailleurs anarchiquement, dans l'optique de nos aïeux pour lesquels un déplacement s'accompagnait d'un isolement du reste du monde, ce qui était une gêne pour les affaires et, dans la plupart des cas, pour les familles. D'où l'importance du facteur rapidité dans le choix du moyen de transport. Les possibilités de l'électronique et des télécommunications, avec leurs liaisons en temps réel d'un point à un autre du globe, même mobiles, devraient profondément transformer la politique des transports à la condition que les choix y soient déterminés essentiellement par des considérations économiques. C'est ainsi que, sur des distances courtes et moyennes (mettons mille kilomètres), le transport aérien dans des pays comme la France apparaîtra comme le moyen le moins économique, alors que l'avantage de sa rapidité s'estompe déjà à cause des difficultés d'accès aux aéroports et de l'encombrement de l'espace aérien. L'utilisation des trains, équipés de téléphone et, parfois, de télévision et dont la vitesse moyenne pourra encore être accrue de cinquante pour cent avec l'infrastructure actuelle devrait surclasser celle des avions. Il n'en est évidemment pas de même dans les pays en voie de développement, mais, même dans ce cas, les grands axes devraient être équipés par le rail ou la route, la répartition « avions-autres moyens » dépendant du trafic des marchandises.

La rapidité des transports par le rail évoquée ci-dessus sera exploitée au mieux par une conduite automatisée des rames, de même que pour la signalisation ou la banalisation des voies, ainsi qu'on l'a commencé en divers pays. Ce sera, en tout cas, obligatoire pour des moyens comme l'aérotrain.

Même pour des trajets comme la traversée de l'Atlantique, la possibilité de liaisons permanentes de qualité entre les deux continents ou d'autres pourra redonner de l'intérêt aux transatlantiques puisque, par télévision, téléphone ou transmission de données, les affaires pourront être suivies, au besoin par des conférences à plusieurs. Tout dépendra certes du prix des liaisons, mais celui-ci devrait s'adapter au marché.

Dans les villes, la circulation auotmobile sera profondément modifiée grâce aux moyens de l'électronique. Du côté des transports en commun, les moyens du type métropolitain verront leur vitesse et leur capacité accrues par la conduite automatique, les changements de ligne pouvant d'ailleurs se faire automatiquement pour réaliser des liaisons express au moment des heures d'affluence. En ce qui concerne la circulation individuelle, il est possible qu'elle soit assurée par de petites voitures électriques louées dont l'ensemble serait géré par calculateurs.

Sur les routes, le rôle de l'électronique sera surtout une mission de contrôle et de prévision, étendant automatiquement ce qui est actuellement tenté avec les circuits de remplacement.

6. Industries de l'électronique et de l'informatique

Les vues prospectives de cet exposé montrent que ces industries verront s'ouvrir des débouchés tels qu'une expansion privilégiée devrait lui être assurée. En fait, suivant les hypothèses d'écoles adoptées, elle se place du troisième au cinquième rang des activités par secteurs économiques.

Ce n'est pas aussi simple : le financement des applications décrites donne le vertige, financement signifiant d'ailleurs, suivant les régimes politiques, moyens financiers ou moyens humains. Or, en France, pour le VI[e] Plan seul et pour un acroissement de l'activité industrielle de 9,5 % par an, l'industrie, dans son ensemble, réclamera 71 milliards de francs pour ses investissements. On ne voit pas encore si ce sera possible ; que dire s'il faut préparer l'ensemble des prévisions décrites !

Le problème est le même en tous pays, même s'il s'exprime autrement, et se traduit à des degrés divers par le degré d'inflation subi. Le Japon lui-même, inspirateur des expansions, n'échappe pas à la règle.

En fait, cela signifie que cette prospective échappe aux seuls moyens d'une nation, aussi puissante qu'elle soit. Ce qu'on peut dire, c'est que, si un pays n'en « suit » pas, au moins de loin, les développements, il ira au dépérissement économique. L'électronique et l'informatique présentent des cas où est prouvée la nécessité d'accords supranationaux : certains sont amorcés, mais ne laissent pas toujours assez de possibilités pour tous les partenaires.

Ces deux disciplines ne sont d'ailleurs pas les seules à exiger de tels rapprochements : les problèmes de la pollution et de l'énergie en sont d'autres cas brûlants.

Ainsi, sous l'emprise des techniques, l'économie forcera la politique et ce sera certainement un chapitre essentiel de la prospective des décennies à venir.

P. DAVID

Ingénieur général des Télécommunications
Ancien Président de la SFER

G. LEHMANN

Directeur scientifique à la CGE
Ancien Président de la SFER

Henri de Bellescize (1884-1966)

L'Onde Electrique s'est toujours fait un devoir de consacrer quelques pages à ses fondateurs et à ses principaux collaborateurs, lorsqu'ils venaient à disparaître, pour rappeler leurs travaux et leur exprimer sa reconnaissance. A une exception près, que nous voudrions réparer aujourd'hui.

H. DE BELLESCIZE, ingénieur, inventeur et théoricien, auteur de plusieurs articles très remarqués en leur temps, est décédé en 1966, quelques années après avoir pris sa retraite, sans que nous en soyons avisés. Mais ce numéro du « Cinquantenaire » nous donne l'occasion de réparer notre omission, et de rendre un hommage tardif, mais sincère, à l'originalité de ses travaux.

⁂

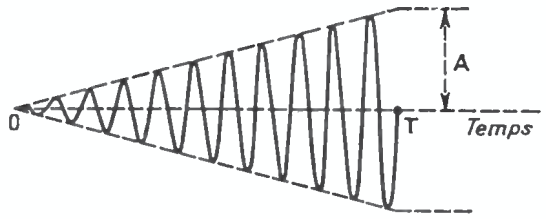
Né en 1884, Henri, Marquis DE REGNAULD, DE BELLESCIZE était entré dans la Marine en 1901.

Il s'était intéressé tout de suite à la TSF, ce qui lui valut, pendant la guerre 1914-1918, la responsabilité (comme Lieutenant de vaisseau) de commander le Centre TSF de Toulon-Mourillon, dans lequel une partie du matériel avait d'ailleurs été inventé ou mis au point par lui-même. Ses mérites furent reconnus par le grade d'Officier de la Légion d'Honneur, sur rapport du Chef d'Etat-Major constatant qu'il avait « victorieusement résolu la plupart des problèmes de TSF posés au cours de cette guerre, et que, grâce à lui, la Marine était dotée d'un matériel supérieur à tous ceux existant actuellement ».

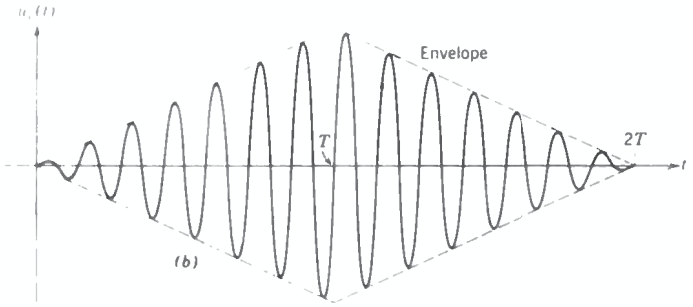
Aussitôt après, en 1919, il équipait en matériel de mesure l'*ALDEBARAN* (Cdt GUIERRE) dans sa fameuse croisière autour du monde, où fut constaté pour la première fois le renforcement des signaux (ondes longues) aux antipodes exacts de la station d'émission. Il se décidait ensuite à quitter la Marine, et à se créer un laboratoire personnel, lui permettant de jouer un rôle d'Ingénieur - Conseil auprès d'un important groupe industriel.

Y travaillant donc en toute indépendance, il entreprenait diverses études originales pour clarifier les principaux facteurs de progrès. De 1922 à 1941, il a publié ses idées et ses résultats en une vingtaine d'articles, plus des brevets, dont une liste est donnée en annexe et dont plusieurs ont paru, en leur temps, dans notre Revue.

Il serait fastidieux d'énumérer *toutes* les idées que l'on peut y trouver : contentons-nous d'en mentionner quelques-unes, peut-être devenues banales, mais dont on appréciera le mérite si l'on veut bien se reporter à l'époque où la « TSF » était encore dans l'enfance : pas d'oscilloscopes, appareils de mesure rudimentaires à ces fréquences..., la construction des émetteurs et des récepteurs procédait d'imagination et d'empirisme, nos connaissances sur la propagation des ondes se limitaient à la « formule d'AUSTIN ».



DE BELLESCIZE. — Les communications radio-électriques, figure 5, page 168.



Enveloppe detection of (noiseless) pulsed sine wave. — WOZENCRAFT and JACOBS. Principles of Communication Engineering, figure 7.32, page 520.

FIG. 1.

Observant que la portée des liaisons était ordinairement limitée non par l'intensité absolue du signal, mais par le rapport signal/bruit atmosphérique, DE BELLESCIZE étudiait simultanément les deux termes de ce rapport.

Il observait les variations (« fading ») du signal, leur caractère « sélectif », et, dès 1935 [16, p. 146], montrait l'intérêt d'une régulation automatique par un dispositif d'asservissement.

Il étudiait également la nature des parasites atmosphériques ; il exprimait leur caractère aléatoire en disant que « sur les courbes représentant leur variation en fonction du temps, l'échelle des temps est indifférente » [14, p. 335]. Il notait aussi que la répartition de leur amplitude n'était *pas* gaussienne, et que leurs pointes maximales pouvaient atteindre un niveau très supérieur à celui de tous les signaux possibles [18, p. 14], qui se trouvaient alors « démodulés » [16, p. 9, 41, 42] : « il se peut que la liaison soit interrompue par instants, alors que la puissance serait des millions de fois supérieure à celle qui serait suffisante une fois sur dix » (ce point semble encore parfois méconnu aujourd'hui).

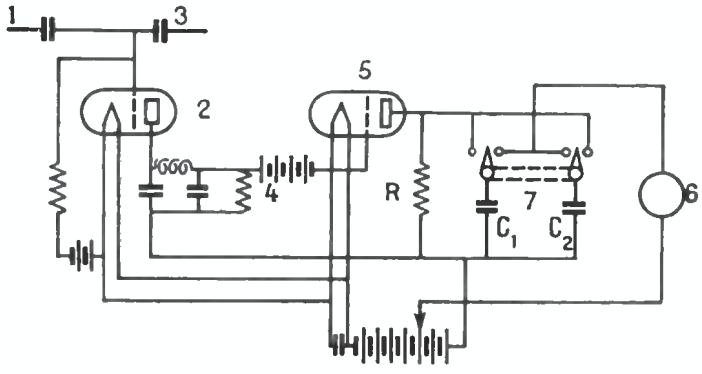
Il passait ensuite en revue tous les moyens possibles d'améliorer le rapport signal/bruit — et d'abord la « *sélection* » par un ou plusieurs résonateurs. Il soulignait l'intérêt de réduire la largeur du filtre ainsi constitué (p. ex. grâce à la réaction (1) ou au changement de fréquence), en augmentant sa constante de temps 0, éventuellement même au-delà de la durée T du signal élémentaire, de manière à obtenir une croissance *linéaire* de l'amplitude, quitte à court-circuiter automatiquement après cette durée pour repartir de zéro (fig. 1, gauche).

Il préconisait aussi de combiner le signal avec une oscillation locale « homodyne » synchronisée en phase, et manipulation par inversion de phase, d'où gain de 18 dB [15], [16, p. 95] ; l'énergie pouvait alors être emmagasinée dans un simple condensateur, ou, alternativement, dans deux condensateurs C_1 et C_2 par le jeu d'un commutateur 7 (fig. 2, gauche).

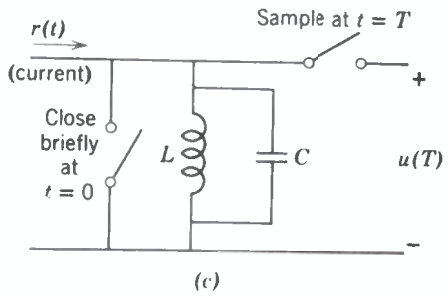
La comparaison de ces schémas avec ceux (fig. 1 et 2, à droite) tirés d'un ouvrage récent (2) montre

(1) On se souvient des excellents résultats obtenus par les amateurs dans les essais transatlantiques de 1923-1925 avec de simples « détectrices à réaction ».

(2) WOZENCRAFT, JACOBS, « Principles of Communication Engineering ».



DE BELLESCIZE. — Les communications radio-électriques, figure 6, page 169. (1. Arrivée du signal ; 2. Détecteur ; 3. Arrivée de l'oscillation locale synchrone ; 4. Résistance donnant une tension continue ; 5. Tube amplificateur ; 6. Relais imprimeur ; 7. Inverseur commandant la charge et la décharge des condensateurs C_1, C_2 ; RC_1, RC_2, circuits apériodiques à grande constante de temps).



Integrate and dump filter. — WOZENCRAFT and JACOBS, Principles of Communication Engineering, figure 4.20, page 237.

FIG. 2.

qu'il s'agissait bien d'un premier exemple des « filtres adaptés » et « récepteurs cohérents » à la mode du jour.

M. DE BELLESCIZE concluait par exemple que « avec des signaux stables, des commandes télémécaniques suffisamment lentes ne seraient jamais troublées par les parasites » — affirmation bien vérifiée par l'expérience (3).

Il signalait aussi l'intérêt des « limiteurs d'amplitude » [12], de la « bande latérale unique » (gain pouvant atteindre 34 dB, [16, p. 95], l'avantage d'un code à *trois* signes (+, 0, −) ; dès 1924 il brevetait l'idée [9] de constituer un alphabet par le choix des fréquences dans la bande attribuée à la communication, ce qui était un raffinement de la modulation de fréquence, dont il soulignait par ailleurs les avantages [17, 18]. Il prévoyait aussi la possibilité de coder l'adresse d'un message de telle sorte qu'il puisse être aiguillé *automatiquement* par le Centre de Réception vers son destinataire.

Une synthèse de toutes ces idées le conduisait à discuter le problème général de « réussir » une communication [16, p. 185/194] en fonction des réseaux de courbes statistiques relatives aux niveaux respectifs du signal et des parasites, du code employé, de la vitesse de manipulation et du nombre de répétitions nécessaires.

« Fixer la vitesse de manipulation », écrivait-il [18, p. 60], « est aussi rationnel que de construire des automobiles à une seule vitesse, sous prétexte qu'il est plus commode de n'en pas changer ».

On peut se demander pourquoi des idées techniques aussi correctes n'ont pas, en leur temps, retenu davantage l'attention (4). Sans doute, les exprimait-il sous une forme ésotérique ; peut-être aussi leur réalisation pratique apparaissait-elle trop délicate à des « opérateurs moyens » qui n'avaient pas son habileté. Certaines, enfin, étaient manifestement en avance sur leur temps. Nous en trouvons un exemple dans sa dernière publication.

En effet, dans « *La Poste Electrique* » (1941) [18], il préconisait la généralisation des liaisons en ondes courtes pour former un immense réseau, de capacité 1 300 000 mots/minute (p. 18), accompagnée d'une telle baisse des tarifs que la télégraphie se substituerait *entièrement* au trafic postal, déshonoré par sa lenteur. Il estimait même que si cette étape n'était pas encore franchie, c'était par l'inertie coupable et le « culte de l'incompétence » des grandes compagnies, ce qui amenait évidemment une contre-attaque.

Sans doute se laissait-il emporter par son enthousiasme, quant à la date possible de cette révolution ; mais quant au principe même, il était prophète, car après avoir dormi trente ans, cette suggestion vient d'être reprise — dans son principe au moins — sous deus formes différentes : soit en utilisant la télévision sur câbles (CAVT) (5), soit par l'intermédiaire de satellites spéciaux (6).

Après avoir occupé les dernières années de sa vie à des études historiques et philosophiques, H. DE BELLESCIZE est décédé en 1966.

Liste des publications de H. de Bellescize

[1] 1920. Etude de quelques problèmes de radio-électricité (Gauthier-Villars).

[2] 1920. (22 janvier). Brevet français 508.833 - Radiotélégraphie secrète.

[3] 1921. La résonance et la sécurité des communications radioélectriques (*Radio-Electricité*, juillet 1921, pp. 28-29).

[4] 1922. La réaction dans les amplificateurs à résonance (*Radio-Electricité*, mai-juin 1922, pp. 238, 243).

[5] 1923. Perturbations atmosphériques et communications par TSF (*Radio-Electricité, ?*).

[6] 1923. (20 avril). Brevet français 577.604.

[7] 1924. La Technique Moderne, 15 avril 1924, p. 281.

[8] 1924. Evolution des communications radioélectriques (anal. *Onde Electrique*, 1924, novembre, p. 68)

[9] 1924. Brevet français 588.424.

[10] 1926. La modulation dans les récepteurs (*Onde Electrique*, 1926, pp. 168-172).

[11] 1926. Perturbations atmosphériques et longueurs d'onde *L'Onde Electrique*, 1926 pp. 347-358).

[12] 1926. Le superhétérodyne - Principe, Invention, Evolution (Chiron, éd.).

[13] 1927. Dispositif atténuant l'effet du fading (*Onde Electrique*, mars 1927, pp. 110-119).

[14] 1927. La résonance et les atmosphériques (*Onde Electrique*, août 1927, pp. 333-356, septembre 1927, pp. 427-444).

[15] 1932. La réception synchrone (*Onde Electrique*, mai, p. 209 ; juin, p. 225 ; juillet, p. 241).

[16] 1935. Les communications radioélectriques (Gauthier-Villars, 2 fascicules).

[17] 1937. (21 août). Brevet USA 2.176.168 - Télégraphie commerciale par modulation de fréquence.

[18] 1941. La poste électrique et la radiotélégraphie par modulation de fréquence (Rey, Lyon).

(3) Par exemple la télécommande de la canonnière « Diligente » par sélecteur à lames vibrantes, à laquelle participaient MM. GUERITOT, Léon BRILLOUIN, FROMY, MAGINOT et l'un des auteurs de ces lignes.

(4) Les auteurs du présent article croient n'avoir pas de reproche à se faire sur ce point. Par exemple, dans le fascicule « *Protection des récepteurs contre les parasites* » (1936) de l'Ecole Supérieure d'Electricité (P. DAVID) le nom de M. DE BELLESCIZE était cité 17 fois. Signalons en outre que les USA lui en ont témoigné leur reconnaissance.

(5) GROSS, PIEEE., 58, 7, July 1970, pp. 1002-1012.

(6) GROSS, *Telecommunications*, May 1970, pp. 21-25.

G. GINIAUX

Dir. des Publications des Editions Dunod. Ancien Directeur des Editions Chiron.

Etienne Chiron

Cinquante ans d'édition de l'Onde Electrique

Janvier 1922 : des presses d'une imprimerie du XIV[e] arrondissement à Paris, sortait une nouvelle revue : 84 pages 16 × 24 cm sous couverture verte. Le N° 1 de *L'Onde Electrique* était né grâce aux soins d'Etienne CHIRON (1) qui avait participé quelques mois plus tôt à la fondation de la « Société des Amis de la TSF », devenue par la suite « Société Française des Electriciens et Radioélectriciens ».

Etienne CHIRON signait ce premier numéro : « Le directeur-gérant », prenant ainsi les responsabilités administratives de la publication, responsabilités qu'il devait assumer jusqu'à sa mort en 1947. La Maison qu'il a fondée et qui poursuit son activité sous la raison sociale « EDITIONS CHIRON » continue la publication de *L'Onde Electrique*, maintenant dans sa cinquantième année de parution.

Pendant les dix-huit premières années, *L'Onde Electrique* conserva son format « bibliothèque » et sa livrée verte, sous laquelle elle fut bientôt connue dans tous les laboratoires d'études, dans les bibliothèques universitaires et dans les bureaux de documentation industrielle. Il ne nous appartient pas de marquer ici l'apport rédactionnel de haute valeur scientifique, et même de caractère historique, de *L'Onde Electrique*.

La modeste part qui revient à l'éditeur de la publication est seulement évoquée ici. Etienne CHIRON se qualifiait souvent, avec humour, le « premier membre » de la Société, voulant ainsi rappeler que s'il était aux côtés du Général FERRIÉ et du Commandant CORNU, aux côtés du Professeur ABRAHAM, de MM. BLONDEL, BRENOT, PARAF et PEROT, membres du Comité fondateur, il ne voulait être pour sa part, que « premier membre inscrit à la Société des Amis de la TSF » qu'ils avaient fondée.

Dès 1919, Etienne CHIRON avait d'ailleurs rencontré les militaires FERRIÉ et CORNU, et commencé l'édition des meilleurs ouvrages sur la télégraphie et la téléphonie sans fil.

L'Onde Electrique devait ainsi apporter la solution aux problèmes de la publication en langue française des travaux des meilleurs spécialistes français, et permettre de suivre le développement accéléré de la radioélectricité et des sciences annexes.

Ennemi des demi-mesures, d'un jugement rapide et précis, Etienne CHIRON, homme cultivé, humaniste, a su apporter dans les relations avec les scientifiques, militaires ou universitaires, une générosité de cœur qui lui amenait toutes les sympathies. Cette forme d'esprit le destinait à être le promoteur de *L'Onde Electrique*, qui, après des dizaines d'années de renom parmi les chercheurs du monde entier, devait devenir, sans renier cette vocation première, la première revue française industrielle en matière d'électronique et de télécommunications.

Le Professeur René MESNY, MM. Pierre DAVID, Paul ABADIE, Pierre RIGAL, Philippe LE CALVEZ, qui furent les grands animateurs de la rédaction de *L'Onde Electrique*, collaborèrent avec Etienne CHIRON, dont une des œuvres essentielles de sa vie d'éditeur restera la publication de la petite revue verte pendant près de vingt-cinq ans.

Nous publions à la page 540 de ce numéro une reproduction d'une lettre du Général FERRIÉ à Etienne CHIRON le 30 juillet 1921, les premiers articles arrivaient boulevard Latour-Maubourg, le numéro 1 allait être confié à l'éditeur. Ce petit mot, conservé précieusement par Etienne CHIRON, est un émouvant témoignage des premiers efforts. *L'Onde Electrique* allait naître ; le rôle qu'elle joue depuis cinquante ans dans la presse scientifique et technique française a répondu magnifiquement à la valeur et au désintéressement de ses promoteurs.

(1) †Etienne CHIRON (1875-1947), éditeur technique et scientifique depuis 1907.